

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2016

Bc. Radek Špringer



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY

A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

**NÁVRH A REALIZACE 3D TISKÁRNY S PODPOROU
SÍŤOVÉHO TISKU**

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF 3D PRINTER WITH NETWORK PRINTING SUPPORT

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Radek Špringer

VEDOUcí PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Ondřej Krajsa, Ph.D.

BRNO 2016



Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Telekomunikační a informační technika**

Ústav telekomunikací

Student: Bc. Radek Špringer

ID: 146971

Ročník: 2

Akademický rok: 2015/16

NÁZEV TÉMATU:

Návrh a realizace 3D tiskárny s podporou síťového tisku

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte a realizujte síťovou 3D delta tiskárnu založenou na platformě BeagleBone. K této platformě realizujte rozšiřující modul pro řízení krokových motorů. U tiskárny optimalizujte vyhřívání tiskového prostoru a kontrolu chlazení výtisku.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] BELL, Charles. 3D Printing with Delta Printers. Berkeley, CA: Apress, 2015. DOI: 10.1007/978-1-4842-1173-1. ISBN 148421174X.

[2] YAU, Hunyue. Learning BeagleBone. Packt Publishing, 2014. ISBN 178398290X.

[3] GRIMMETT, Richard. Mastering BeagleBone Robotics. Packt Publishing, 2014. ISBN 1783988908.

Termín zadání: 1.2.2016

Termín odevzdání: 25.5.2016

Vedoucí práce: Ing. Ondřej Krajsa, Ph.D.

Konzultant diplomové práce:

doc. Ing. Jiří Mišurec, CSc., předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Cílem této diplomové práce je navrhnout 3D tiskárnu typu delta. Popsat technologie 3D tisku používané touto tiskárnou, základní vlastnosti tiskárny a komerčně dostupný materiál používaný při tisku a jeho srovnání. Stanovit veškeré hardwarové komponenty, které jsou nezbytně nutné ke konstrukci vlastní 3D tiskárny typu delta. Vytvořit návrh a estrojit expanzní desku, ke které budou připojeny veškeré hardwarové komponenty tiskárny. Optimalizovat vyhřívání tiskového prostoru a chlazení výtisku. Rozšířit 3D tiskárnu o webový server, přes který bude zaručena možnost síťového tisku.

KLÍČOVÁ SLOVA

3D, 3D tiskárna, delta, BeagleBone Black, vlákno, expanzní deska, síťový tisk

ABSTRACT

The goal of this thesis is to design a 3D printer type delta. To describe 3D printing technologies used by this printer, basic printer features and commercially available material used at the print and its comparison. To define all hardware components, which are necessary for construction of the 3D printer type delta. To create a proposal and construct an expansion board to which all hardware components of the printer will be connected. To optimize the print space heating and cooling of the printout. To extend the 3D printer with a Web server, which will ensure the network printing possibility.

KEYWORDS

3D, 3D printer, delta, BeagleBone Black, filament, expansion board, network printing

ŠPRINGER, Radek *Návrh a realizace 3D tiskárny s podporou síťového tisku*: diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2015. 72 s. Vedoucí práce byl Ing. Ondřej Krajša, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Návrh a realizace 3D tiskárny s podporou síťového tisku“ jsem vypracoval(a) samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor(ka) uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil(a) autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl(a) nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom(a) následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora(-ky)

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Ondřeji Krajsovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Brno

.....

podpis autora(-ky)

PODĚKOVÁNÍ

Výzkum popsáný v této diplomové práci byl realizován v laboratořích podpořených z projektu SIX; registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operační program Výzkum a vývoj pro inovace.

Brno

.....
podpis autora(-ky)

OBSAH

Úvod	13
1 3D tisk	14
1.1 Proces 3D tisku	14
1.2 Vlákno	16
2 Hardware	19
2.1 Konstrukce	20
2.2 Osy	22
2.3 Komponenty	24
2.3.1 Extrudér	24
2.3.2 HotEnd	25
2.3.3 Lineární kolejnice	26
2.3.4 Krokový motor	27
2.3.5 Základní deska	28
2.3.6 Rám	28
2.3.7 Elektronika	29
2.3.8 BeagleBone Black	29
3 Expanzní deska	31
3.1 Napájení	32
3.2 Ovladače krokových motorů	34
3.3 MOSFET ovladače	36
3.3.1 Pulzně šířková modulace	36
3.3.2 I2C sběrnice	37
3.3.3 I2C měnič úrovní	37
3.3.4 PWM driver	37
3.4 Koncové stupně	39
3.5 Teplotní senzory	39
3.5.1 Termistor 100K	39
3.5.2 Teplotní senzor Dallas DS18B20	41
3.6 Porovnání s expanzní deskou Ramps 1.4	41
4 Software	44
4.1 Computer Aided Design	44
4.2 Computer Aided Manufacturing	45
4.2.1 Slic3r	47
4.3 Firmware	48

4.4	Síťové ovládání 3D tiskárny	49
4.4.1	OctoPrint	50
5	Optimalizace vyhřívání tiskového prostoru a kontrola chlazení vý- tisku	51
6	Shrnutí hardwaru 3D tiskárny a její cenová kalkulace	53
6.1	Srovnání s Raspberry Pi a Ramps 1.4	54
7	Závěr	56
	Literatura	57
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	59
	Seznam příloh	60
A	Popis GPIO pinů BeagleBone Black	61
B	Screenshoty z webové aplikace OctoPrint.	62
C	Schéma zapojení a deska plošných spojů expanzní desky	63
D	Ukázky zdrojových kódů	71

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Blokové schéma technologie 3D tisku.	16
2.1	Porovnání konstrukce 3D tiskáren.	19
2.2	Blokové schéma 3D tiskárny typu delta.	21
2.3	Geometrie tiskárny typu delta.	22
2.4	Vzájemné umístění os tiskárny typu delta.	23
2.5	Grafické znázornění výpočtu vzájemné polohy os.	24
2.6	Extrudér používaný pro tiskárny Kossel Mini.	25
2.7	Hnací ozubené kolo používané v extrudéru.	25
2.8	HotEnd v6.	26
2.9	Lineární vedení.	27
2.10	Krokový motor využívaný pro 3D tisk.	27
2.11	Vyhřívaná základní deska.	28
3.1	Blokové schéma expanzní desky.	32
3.2	Informační štítek ATX zdroje.	33
3.3	Zapojení 12 V napájecí větve expanzní desky.	34
3.4	Blokové schéma zapojení ovladače krokového motoru DVR8825 doporučené výrobcem.	35
3.5	Možnosti nastavení velikosti střídy u PWM.	36
3.6	Zapojení měniče I2C úrovní PCA9306 na expanzní desce.	38
3.7	Zapojení PWM LED driveru PCA9685 na expanzní desce.	38
3.8	Zapojení obvodu CD4050BD pro ovládání koncových stupňů na expanzní desce.	39
3.9	Zapojení analogového termistoru 100 K na expanzní desce.	40
3.10	Zapojení digitálního teplotního čidla Dallas DS18B20 na expanzní desce a jeho vizuální podoba.	41
3.11	Expanzní deska Ramps 1.4.	42
4.1	Nabídka nastavení kvality tisku v CAM aplikaci Slic3r.	48
4.2	Příklady tisku výplní objektu v pořadí 5 %, 10 %, 15 %, 20 %, 50 %.	48
4.3	Blokové schéma firmware na platformě BeagleBone Black.	49
5.1	Detail mezery mezi HotEndem a tištěným objektem.	52
6.1	Blokové schéma síťového tisku.	55
A.1	Popis GPIO pinů pro BeagleBone Black.	61
B.1	Hlavní nabídka webové aplikace OctoPrint.	62
B.2	Nabídka Control webové aplikace OctoPrint.	62
C.1	Schéma zapojení expanzní desky - 1. část.	63
C.2	Schéma zapojení expanzní desky - 2. část.	64
C.3	Schéma zapojení expanzní desky - 3. část.	65

C.4	Schéma zapojení expanzní desky - 4. část.	66
C.5	Schéma zapojení expanzní desky - 5. část.	67
C.6	Schéma zapojení expanzní desky - 6. část.	68
C.7	Předloha desky plošných spojů spodní strana.	69
C.8	Předloha desky plošných spojů vrchní strana.	69
C.9	Osazovací plán spodní strany desky plošných spojů.	70
C.10	Osazovací plán vrchní strany desky plošných spojů.	70

SEZNAM TABULEK

1.1	Druhy aditivní výroby.	15
1.2	Druhy vláken.	17
2.1	Porovnání technických specifikací vývojových desek.	30
3.1	Výstupní konektory osazené na expanzní desce.	31
3.2	Výkon jednotlivých periférií 3D tiskárny.	34
3.3	Formát nastavení velikosti jednoho kroku na ovladači DVR8825.	35
3.4	Porovnání rozhraní a vlastností mezi Ramps 1.4 a expanzní deskou tohoto projektu.	43
4.1	Srovnání CAD aplikací pro tvorbu 3D modelů.	45
4.2	Příklady příkazů G-code.	46
6.1	Cenový rozpočet jednotlivých komponent včetně celkové ceny.	53
6.2	Soupis tisknutelných dílů včetně množství kusů.	54

ÚVOD

V současné době se technologie 3D tisku stává stále více populární v průmyslové oblasti, ale také v amatérské. Existuje mnoho řešení 3D tiskáren, které si může člověk zkonstruovat doma sám bez nutnosti speciálních nástrojů a technologií. Díky této skutečnosti se lze setkat s lidmi, kteří se otázkami 3D tisku zabývají nebo přemýšlejí o realizaci vlastní 3D tiskárny. Skupinu těchto amatérských vývojářů 3D tiskáren různých typů, designových prvků a tvarů zaštiťuje projekt nazývaný RepRap. V tomto projektu jsou hlavními přispěvateli samotní autoři tiskáren, kteří sdílí své vlastní řešení 3D tiskárny. Jedná se o projekt s otevřeným zdrojovým kódem, ve kterém je možno aktuálně nalézt veliké množství unikátních řešení 3D tiskáren, anebo jednoduché návody na stavbu vlastní domácí tiskárny a to za cenu řádově nižší, než je tomu u komerčních tiskáren.

Cílem této práce je navrhnout a sestavit 3D tiskárnu s podporou síťového tisku. Mezi širokou škálou designových typů 3D tiskáren byla zvolena tiskárna typu delta, která bude v této práci zkonstruována. Na této tiskárně bude postupně popsána technologie 3D tisku, jeho základní vlastnosti včetně komerčně dostupných vláken (filamentů) s jejich srovnáním. Budou zde uvedeny veškeré hardwarové komponenty, které jsou nezbytně nutné k realizaci vlastní 3D tiskárny typu delta. Posléze, na již sestrojené tiskárně, budou vysvětleny kroky ke správné kalibraci a postup k realizaci prvního tisku.

Tato práce se dále zabývá výrobou vlastní expanzní desky, ke které jsou připojeny veškeré hardwarové komponenty 3D tiskárny. Existuje veliké množství již vyrobených expanzních desek, které by mohly být využity pro toto řešení, ale žádná z těchto desek nesplňuje veškeré požadavky pro připojení specifických komponent použitých v této práci. Jako hlavní výpočetní jednotkou tohoto systému je vývojový mikropočítač BeagleBone Black, který s počtem svých vstupně / výstupních pinů, může konkurovat platformě Arduino Mega, které je v odvětví amatérského 3D tisku hojně využívána. Bude zde vysvětlena problematika optimalizace vyhřívání tiskárny a kontrola chlazení výtisků, která má velký vliv na kvalitu a přesnost tisku u objektů velkých rozměrů.

1 3D TISK

Technologie trojrozměrného (3D) tisku se v posledních letech stává stále více populární, svojí popularitu uplatňuje především u lidí, kteří si pořizují 3D tiskárny pro domácí využití, výrobu dárek, uměleckých či abstraktních modelů a samozřejmě také pro rychlou výrobu komponentů nebo prototypů určených k výrobě. Technologie 3D tisku je hojně uplatňována v jednotlivých oborech průmyslu, jako je stavební, strojírenský, či potravinářský průmysl, kde je možné tisknout například pomocí čokolády objekty libovolných tvarů. Dále je 3D tisk uplatňován ve zdravotnictví, pro jednoduchý tisk protéz končetin lidského těla na míru pacientovi, bez nutnosti vytváření finančně nákladných forem, nebo předoperační modely náročných chirurgických zákroků pro lepší vizualizaci a další modely usnadňující práci lékařů.

K velkému rozšíření přispívá zejména fakt, že 3D tiskárny jsou více finančně dostupné pro obvyčejného zákazníka (koupě nové, či stavba vlastní tiskárny) nebo lze najít maloobchodníka, který se zabývá 3D tiskem na zakázku.

Hlavními problémy pro člověka, který se rozhodne pořídit 3D tiskárnu jsou, kde tiskárnu zakoupit, kde získat informace o tom, zda koupit nebo stavět svoji vlastní tiskárnu buď ze stavebnice, nebo úplně od nuly. Pokud stavět vlastní tiskárnu, který stavebnicový model zakoupit, jaký typ vlákna (filamentu) při tisku použít a možná nejdůležitější otázka, jakou tiskovou technologii zvolit.

Tato práce popisuje jak se vyhnout základním problémům při tvorbě vlastní 3D tiskárny se zvláštním důrazem na delta tiskárny. Důraz je kladen zejména na zamezení chyb v tisku (vznik nežádoucích artefaktů v průběhu tisku), odstranění nedostatečné kvality tisku a správnou kalibraci tiskárny. Budou popsány spotřební materiály používané v 3D tisku, včetně typů vláken. [1][2][8]

1.1 Proces 3D tisku

Proces 3D tisku spočívá ve vytvoření trojrozměrného modelu a přípravy jeho tisku. Tento vícestupňový proces začíná jako softwarový model a končí jako soubor pokynů, které může tiskárna aplikovat.

Model objektu je vytvořen za použití programů CAD (Computer-Aided Design), hotový a vytvořený model je dále exportován do STL (Standard Tessellation Language) pro definici 3D modelu jako soubor trojúhelníků různých velikostí v závislosti na požadovaném rozlišení (.stl soubor). Výsledný .stl soubor je rozdělen do vrstev a je vytvořen soubor na úrovni strojových instrukcí (soubor .gcode) za pomoci

programů CAM (Computer-Aided Manufacturing). Výsledný soubor obsahuje instrukce pro ovládání jednotlivých os, směru pohybu, definice teplot pro HotEnd a další. Kromě toho každá vrstva obsahuje mapu stopy, po které se pohybuje tryska s vláknem a vytváří obrys či obsah objektu.

Je důležité pochopit proces a technologii, kterou jsou objekty tištěny. Znalost této technologie napomáhá k lepšímu pochopení hardwaru tiskárny nebo v její údržbě. Výše popsaná technologie se nazývá aditivní a používá se u většiny 3D tiskáren. Aditivní tisk má několik forem a typů, které odkazují na použití materiálů a postupů k vytištění objektu. Nicméně, všechny tyto formy využívají stejné základní kroky (výrobní postup) k vytvoření objektu.

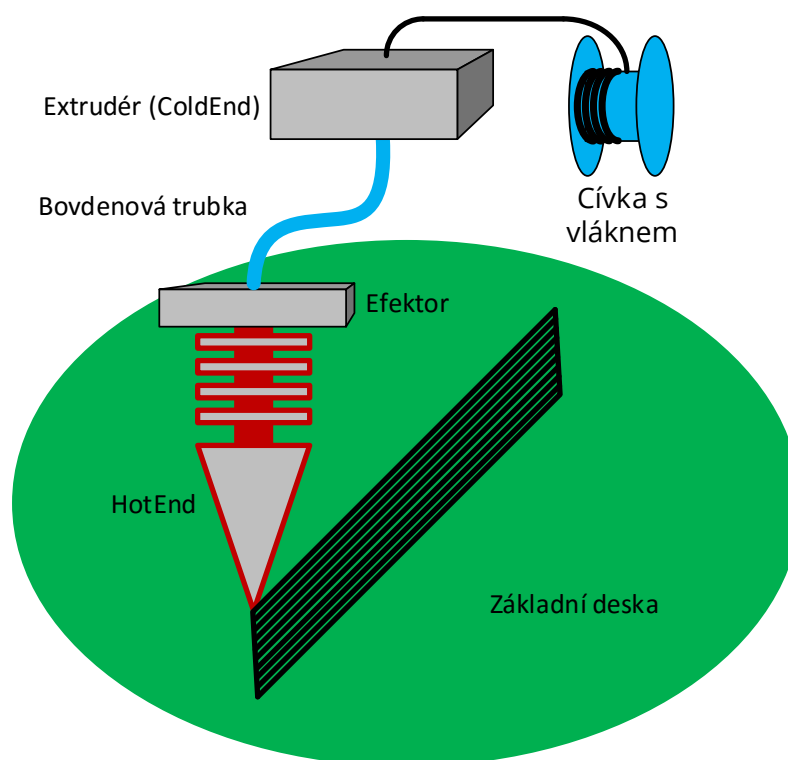
Nejběžnější aditivní technologie pro 3D tiskárny je FFF (Fused Filament Fabrication), která tiskne z termoplastů jejich roztavením a nanášením v tenkých vrstvách. Když tiskárna tiskne objekt, použitý materiál přichází ve formě vlákna (navinutého na cívce) vloženého do extrudéru, který se skládá ze dvou částí. První část získává vlákno z cívky a tlačí jej do topného tělesa (ColdEnd), druhá část extrudéru zahřívá vlákno na jeho bod tání (HotEnd), zde je materiál vytlačován z trysky ve formě tenkých vláken. Další formy aditivní výroby se mohou lišit použitými mechanismy a materiály k vytváření objektu, které jsou popsány v tabulce 1.1.

Tab. 1.1: Druhy aditivní výroby. [1]

Typ	Výrobní proces	Materiály
Vlákno	objekt tisknutý vrstvu po vrstvě, kde je materiál ve formě vláken vytlačován z vyhřívané trysky	různé plasty, dřevo, nylon, atd.
Drát	elektronový paprsek je použit k roztavení drátu, objekt vzniká vrstvu po vrstvě	většina kovových slitin
Prášek	nanesený prášek je působením laseru nataven a dochází k jeho spékání v požadovaném místě, okolní materiál zůstává nespečen a slouží jako podpora	polyamin, nylon, vosk, sádra, kovové prášky
Laminát	model je tvořen velkým množstvím fólií, jednotlivé fólie jsou přilepené k předchozí vrstvě a laserem je následně vyřezána kontura objektu	papír, kovová fólie, plastová fólie

Na obrázku 1.1 je zobrazen náčrtek procesu 3D tisku včetně komponent popsaných v tomto oddílu. Dále zobrazuje maketu extrudéru a cívku s vláknem. Vlákno

je vloženo do extrudéru (ColdEnd) a poté je přivedeno do trysky (HotEnd) pomocí bovdenové (PTFE) trubky. Po zahřátí se vlákno vytlačuje na základní desku, tloušťka vlákna je dána velikostí otvoru trysky, který je v rozpětí od 0,2 mm až 0,5 mm nebo větší. [1][2][8]



Obr. 1.1: Blokové schéma technologie 3D tisku. [1]

1.2 Vlákno

Existuje mnoho typů vláken a mnoho dalších vzniká každý rok. Vlákno se vyrábí v různých velikostích průměru (obvykle 1,75 mm nebo 3,0 mm) a v desítkách barevných odstínů. Může být zakoupeno vlákno, které má lesklý nebo matný povrch, svítí ve tmě, vlákno s malými kousky kovu či blýskající se na denním světle. Vlákno se obvykle prodává navinuté na plastové či dřevěné cívce v čisté hmotnosti 1 kg a celkové délce navinutého vlákna přibližně 400 m.

Mezi nejběžnější typy vláken patří plasty nazývané PLA (polylaktidová vlákna) a ABS (akrylonitril butadien styren). Každé z těchto vláken má své určité vlastnosti a požadavky na nastavení topného tělesa tiskárny. Tabulka 1.2 uvádí nejběžnější

vlákna, včetně jejich zkratk, teploty tání (vlákno se stává dostatečně měkké k tisku) a popisu vlastností jednotlivých materiálů.

Tab. 1.2: Druhy vláken. [1][8]

Druh vlákna	Zkratka	Teplota tání [°C]	Popis
Polykarbonát	PC	155	odolné proti nárazu, dobré optické vlastnosti
Polyamid 6.6	Nylon	220	nízké tření, nízká stálost, sklon ke vzniku statického náboje
Vysoce houževnatý polystyren	HIPS	180	podobný jako ABS, odolnost proti nárazu, možný přímý styk s potravinami
Akrylonitril butadien styren	ABS	215	odolnost, flexibilita, snadno modifikovatelný, odolnost proti vyšším teplotám
Polyethylen tereftalát	PET	210	vyrobena z potravinářského substrátu, zcela recyklovatelný
Polyvinylalkohol	PVA	180	rozpuštěný ve vodě, použití jako podpora materiálu
Polylaktid	PLA	160	získané z rostlin, biologicky odbouratelné

Nezáleží na tom, jestli je tiskárna zakoupena nebo postavena, ale výběr vlákna bude hrát velkou roli ve volbě specifického hardwaru. Především se jedná o tyto parametry:

- šířka extruderu a HotEndu,
- teplotní charakteristika HotEndu a jeho maximální teplota,
- vyhřívání základní desky.

Šířka extruderu a HotEndu je určena podle toho, jaký průměr vlákna bude využíván v budoucím tisku. Lze si vybrat z průměrů 1,75 mm nebo 3,0 mm. Teplotní charakteristika HotEndu a jeho teplotní nastavitelnost dává možnosti tisknout libovolným druhem vlákna. Vyhřívání základní desky je potřebná při tisku specifickým vláknem (ABS, HIPS, Nylon a PC), kde je zapotřebí tisknutý objekt vyhřívát.

Většina tiskáren, které lze v dnešní době pořídit, jsou konstruovány tak, aby byly schopny tisknout z PLA nebo ABS materiálu. V tomto případě vyvstává otázka, který z těchto materiálů je kvalitnější a který použít pro navržený objekt. Názory

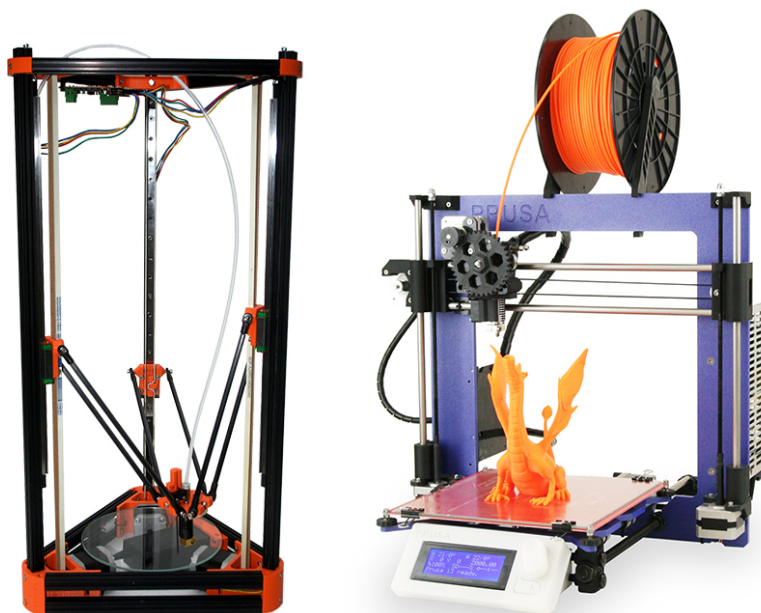
lidí se v tomto ohledu hodně liší a každý doporučuje ten materiál, se kterým je nejvíce spokojený. Nejdříve je vhodné uvážit, jaké fyzikální a chemické vlastnosti od tištěného objektu jsou požadovány a poté se rozhodnout, který materiál využít. [1][8]

- **PLA:** od klasických vláken se odlišuje tím, že je vyrobeno čistě z přírodních materiálů a obnovitelných zdrojů. Hlavní surovinou pro výrobu je rostlinná biomasa, kukuřičný škrob a další přírodní látky. Takto vyrobené vlákno je zdravotně nezávadné a je možné jej ekologicky odbourat. Vlákno si zachovává pružnost, tvrdost a odolnost jako jiné plasty. PLA je považováno za univerzální materiál pro 3D tisk, který je vhodný pro tisk modelů se složitým povrchem nebo velikými rozměry. Nevýhodou je, že ve vlhkém prostředí absorbuje vlhkost a na povrchu objektu vznikají povrchové vady ve formě malých bublinek, proto klade vyšší nároky na skladovací podmínky.
- **ABS:** je označováno jako nejpoužívanější vlákno při 3D tisku. Výhodami tohoto vlákna je především zdravotní nezávadnost, odolnost vůči nízkým i vysokým teplotám a mechanickému poškození. Nevýhodou tohoto vlákna je, že při ochlazení může docházet k deformaci již vytištěného objektu. Pro své vlastnosti je hojně využíváno pro výrobu široké škály produktů od domácích potřeb, hraček, až po díly v automobilovém a dalším průmyslu.

2 HARDWARE

Naprostou většinu doma nebo komerčně vyráběných 3D tiskáren zastupují kartézské tiskárny nebo delta tiskárny. Existují i další návrhy 3D tiskáren, ale tyto návrhy zastupují pouze malou skupinu. Mezi kartézskými a delta tiskárnami lze nalézt velké rozdíly. Největší rozdíl spočívá v samotné konstrukci tiskárny. Kartézské tiskárny mají obdélníkový nebo čtvercový tvar sestavení a delta tiskárny trojúhelníkový nebo válcovitý tvar. Většina delta tiskáren používá kruhovou nebo šestiúhelníkovou základní desku a umožňuje tisknout vysoké objekty. Naproti tomu kartézské tiskárny mají čtvercovité nebo obdélníkové základní desky a umožňují tisknout modely o větší šířce. Další rozdíl spočívá v orientaci výchozího bodu $([0,0,0])$ na základní desce. Kartézské tiskárny využívají k nastavení výchozího bodu libovolného rohu základní desky. Delta tiskárny nastavují svůj výchozí bod na střed kruhové základní desky. U kartézské 3D tiskárny se každá osa pohybuje v jedné rovině a jednotlivé osy jsou na sobě nezávislé. Delta tiskárna využívá malé pohyby ve všech 3 osách, aby se přesunula na definované místo $([X,Y,Z])$. To znamená, že se nemůže pohybovat v ose X (nebo v ose Y) z jedné polohy do druhé bez změny všech tří os, jako je tomu u kartézských tiskáren (delta tiskárna se mohou pohybovat pouze ve vertikálním směru). Nejjednodušší pohyb je v ose Z, kde se všechny 3 osy pohybují současně.

Na Obrázku 2.1 jsou zobrazeny tyto dvě tiskárny, mezi kterými lze pozorovat výše popsané rozdíly.



Delta tiskárna Kossel Mini. [8]

Kartézská tiskárna Prusa i3. [8]

Obr. 2.1: Porovnání konstrukce 3D tiskáren.

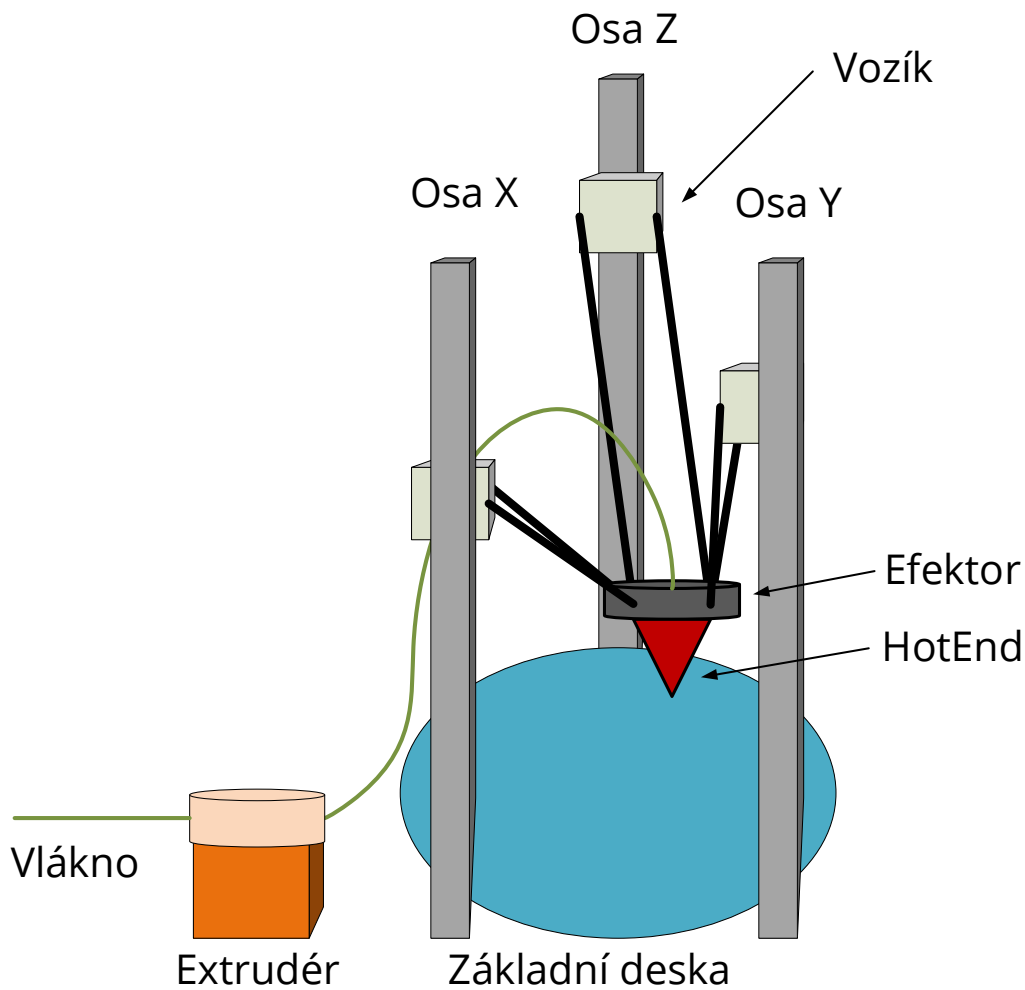
Výše zmíněné 3D tiskárny lze rozdělit do třech základních kategorií:

- **Profesionální:** tato kategorie obsahuje ty dodavatele, kteří nabízejí 3D tiskárny vyrobené ke komerčnímu prodeji, včetně záruční lhůty a možností podpory. Tyto tiskárny nabízejí vyšší úroveň kvality a přesnosti tisku.
- **Zákaznická:** do této kategorie spadají tiskárny, které si lze zakoupit jako „stavebnici“ a sestavit si je vlastnoručně podle přiloženého návodu. Prodejci těchto tiskáren většinou neposkytují záruku na produkt a jeho budoucí podporu jako je tomu v profesionální kategorii. Takto postavené tiskárny nabízejí stejnou kvalitu tisku jako profesionální tiskárny, ale s výrazně nižší pořizovací cenou.
- **Amatérská:** uživatelé v této kategorii nabízejí tiskárny implementované z jednoho nebo více RepRap (Replicating Rapid Prototyper) návrhů. Tyto návrhy jsou založeny na OpenSource a jsou určeny především pro vlastní výrobu tiskárny. To znamená, že tyto tiskárny jsou uživatelem stavěny od nuly. Tato kategorie není cílená na uživatele, kteří chtějí otevřít krabici a začít hned tisknout, ale na uživatele, kteří mají technické znalosti nebo jenom touhu si postavit vlastní 3D tiskárnu. Výhodou této kategorie je otevřenost systému RepRap, do kterého můžou přispívat jednotliví uživatelé se svými návrhy a vylepšeními. Většina uživatelů poskytuje dostatečnou dokumentaci ke svým modelům, proto není problém pro konečného uživatele implementovat více rozdílných řešení do své 3D tiskárny.

Tato práce se bude zabývat poslední kategorií (amatérskou) a tiskárnám typu delta, proto je v následujícím textu věnována pozornost pouze těmto tiskárnám.[1][2][8]

2.1 Konstrukce

Tato podkapitola popisuje základní komponenty 3D tiskárny, které tvoří delta tiskárnu z hlediska celku a jak tyto komponenty pracují. Znalost funkce jednotlivých komponent poskytuje výhodu při stavbě, opravách nebo kalibraci tiskárny. Postupně bude popsána konstrukce hlavních os, umístění HotEndu, funkce extrudéru, elektroniky a základní desky. Obrázek 2.2 ukazuje maketu delta tiskárny s popisky jednotlivých komponentů.



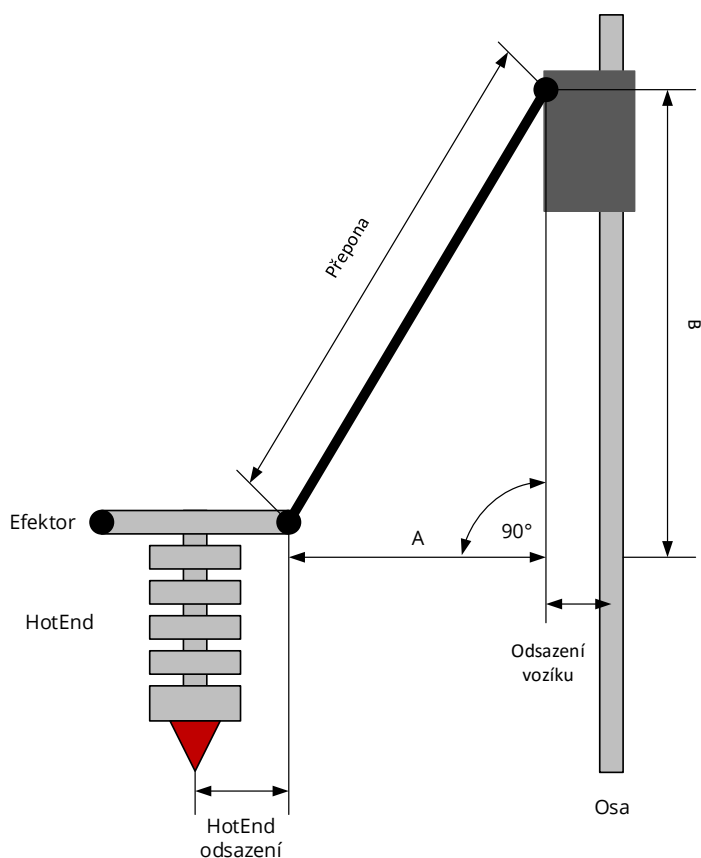
Obr. 2.2: Blokové schéma 3D tiskárny typu delta. [1]

Výše uvedený obrázek vyobrazuje tyto komponenty:

- **Extrudér:** také nazývaný jako ColdEnd (studený konec), zodpovídá za dodávání vlákna pro HotEnd.
- **Základní deska:** zde jsou tisknuty objekty, některé desky mohou být vyhřívané.
- **Osy:** jsou uspořádány svisle a označují se proti (po) směru hodinových ručiček jako X, Y a Z.
- **Vozík:** je připevněn jako pohyblivý bod na jednotlivé osy a jsou k němu připojeny delta ramena pro nastavování pozice efektoru.
- **Efektor:** základna, na které je instalován HotEnd.
- **Delta ramena:** se připojují k vozíku a efektoru dvojicí paralelních ramen.
- **HotEnd:** speciální ohřívač, který zahřívá vlákno na požadovanou teplotu a následně ho vytlačuje skrze trysku na tištěný objekt.

2.2 Osy

Každá osa je konstruována tak, aby umožňovala pohyb ve vertikálním směru. Vozík je upevněn na pohyblivou část osy a tvoří jednu stranu pro připojení paralelních ramen, které propojují vozík s efektem a zajišťují jeho pohyb. Kombinace ramen, efektoru a vozíku tvoří pravoúhlý trojúhelník, jak je zobrazeno na obrázku 2.3. Zde lze vidět, že delta ramena tvoří přeponu pravoúhlého trojúhelníku a zbylé strany A, B jsou naznačeny pomyslnými čarami.

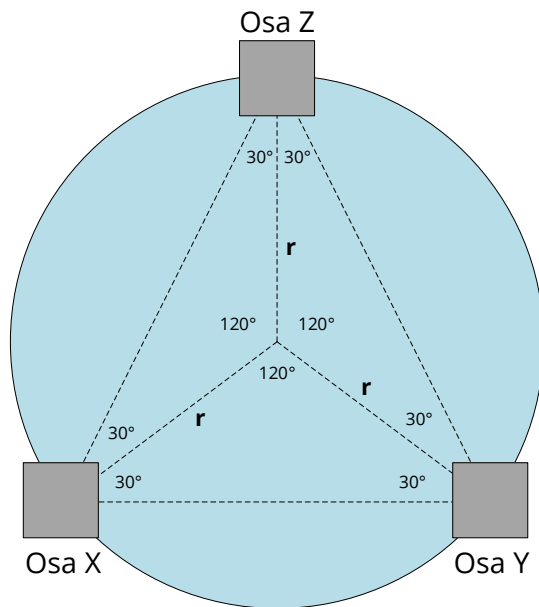


Obr. 2.3: Geometrie tiskárny typu delta. [1]

Existují zde dva druhy odsazení, se kterými musí být počítáno. První odsazení je dáno vzdáleností od středu osy do přípojného bodu delta ramen a druhé odsazení specifikuje vzdálenost mezi středem trysky HotEndu a přípojného bodu delta ramen na efektoru. Tato odsazení je zapotřebí vzít v úvahu při výpočtu pohybu efektoru po tiskové ploše.

Za pomoci goniometrické rovnice pravoúhlého trojúhelníku lze snadno spočítat pohyb jedné strany (B) v závislosti na pohybu druhé strany (A). V tomto případě je známa přesná délka delta ramen, proto lze určit požadovaný pohyb s využitím

vzorce pro výpočet stran pravoúhlého trojúhelníku (Pythagorova věta). Dále je také zapotřebí znát pozici každé jedné osy ve vztahu k ostatním osám. Při pohledu dolů z horní části tiskárny jsou osy umístěny dle obrázku 2.4. Zde si lze všimnout imaginárních trojúhelníků a poloměru kruhu (poloměr delta) tvořeného protnutím středu každé věže. S těmito znalostmi lze snadno vypočítat umístění každé osy za pomoci funkcí Sinus a Cosinus. Výpis 2.1 ukazuje příklad tohoto výpočtu.

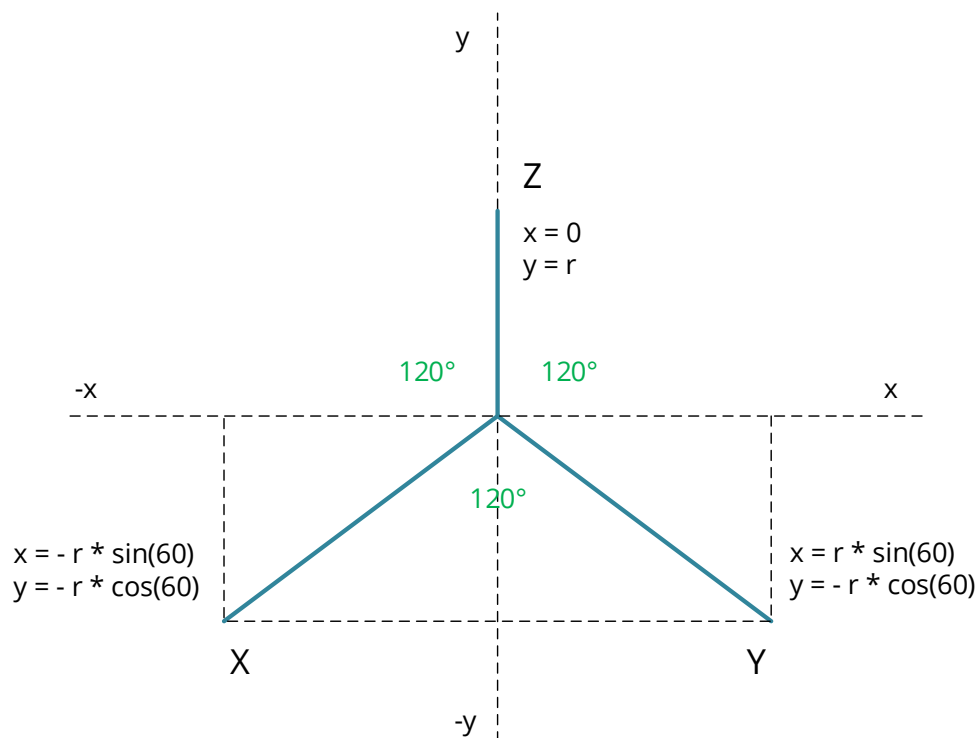


Obr. 2.4: Vzájemné umístění os tiskárny typu delta. [1]

Listing 2.1: Příklad výpočtu vzájemné polohy os.

```
//Osa X
#define DeltaTower1_X -SIN_60*POLOMER
#define DeltaTower1_Y -COS_60*POLOMER
//Osa Y
#define DeltaTower2_X SIN_60*POLOMER
#define DeltaTower2_Y -COS_60*POLOMER
//Osa Z
#define DeltaTower3_X 0.0
#define DeltaTower3_Y POLOMER
```

Na obrázku 2.5 je graficky znázorněn výše popsáný výpočet vzájemné polohy os. Pokud je známa pozice každé věže ve vztahu k ostatním, tak lze vypočítat všechny pohyby přesunutí pomocí umístění věže či pomocí souřadnic.



Obr. 2.5: Grafické znázornění výpočtu vzájemné polohy os. [7]

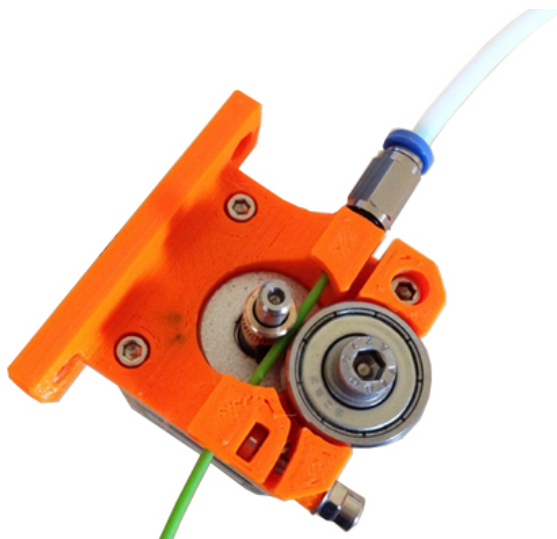
2.3 Komponenty

Hardware a použité materiály pro konstrukci delta tiskárny se značně liší. Lze nalézt tiskárny, které jsou vyrobeny ze dřeva, plastu či z pevného kovového rámu, ale většina dnes vyráběných tiskáren se skládá z kombinací těchto materiálů. V této sekci bude popsáno, z jakých komponent bude tiskárna realizována včetně popisu. Závěrem bude uveden stručný souhrn všech potřebných hardwarových komponent, včetně počtu potřebných kusů a celkové ceny, za kterou lze tiskárnu realizovat. [1][2]

2.3.1 Extrudér

Extrudér je součást, která řídí množství vlákna k vytvoření tištěného objektu. Existuje mnoho možností umístění extrudéru na tiskárnu. Na tiskárně typu delta je nejčastěji připevněn v pevné poloze na rám tiskárny. Extrudér je dále propojen pomocí bovdenové trubky s HotEndem, která zajišťuje bezproblémové dodávání vlákna k vytlačování. Je možno se setkat i s řešením, kde se extrudér nachází v těsné blízkosti HotEndu, na efektoru. Taková to konstrukce u tiskáren typu delta je spíše výjimkou, protože je snaha snížit hmotnost efektoru, delta ramen a HotEndu na minimum. Nižší hmotnost těchto součástí zajišťuje rychlejší a plynulejší pohyb při tiskovém procesu.

Obrázek 2.6 vyobrazuje celkový pohled na extruder, kde se vlákno přivádí spodní částí k pohonné jednotce extruderu, která zajišťuje správné dávkování vlákna pro HotEnd. Jedná se o přímý pohon extrudéru, který nevyužívá převody. Lze použít i převodové krokové motory, pokud potřebujeme jiný poměr dávkování.



Obr. 2.6: Extrudér používaný pro tiskárny Kossel Mini. [6]

Na obrázku 2.7 je ukázán příklad hnacího ozubeného kola, které se stará o pohyb vlákna. Lze si zde všimnout drážky, nebo drážek uvnitř hnacího kola. Ty zvyšují přilnavost při pohybu vlákna. Nevýhoda těchto drážek je v možnosti jejich ucpání, což vede k prokluzování vlákna. Jedná se o běžný problém, a proto si extrudér vyžaduje údržbu před každým tiskem, aby se těmto problémům zamezilo.



Obr. 2.7: Hnací ozubené kolo používané v extrudéru. [3]

2.3.2 HotEnd

HotEnd je koncový prvek, který přijímá podávané vlákno z extrudéru a zahřívá ho na bod tání. Na obrázku 2.8 lze vidět HotEnd používaný pro 3D tiskárny. Tento HotEnd může být využíván ve velkých teplotních rozsazích a poskytuje velmi dobrou rychlost vytlačování pro PLA, ABS a dalších vláken. Lze si všimnout ventilátoru umístěného tak, aby chladil teplotně namáhavou část HotEndu. Chlazení této části je použito,

aby vlákno neměklo (netálo) ještě dříve, než vstoupí do HotEndu. Případné měknutí (tání) vlákna by mělo neblahé účinky v průběhu tisku, kdy je nutné zastavit tisk a vlákno posunout zpět. V tomto případě by se vlákno pouze natáhlo, ale tisk by pokračoval dál a mohlo by dojít k tisku nadbytečných artefaktů.



Obr. 2.8: HotEnd v6. [4]

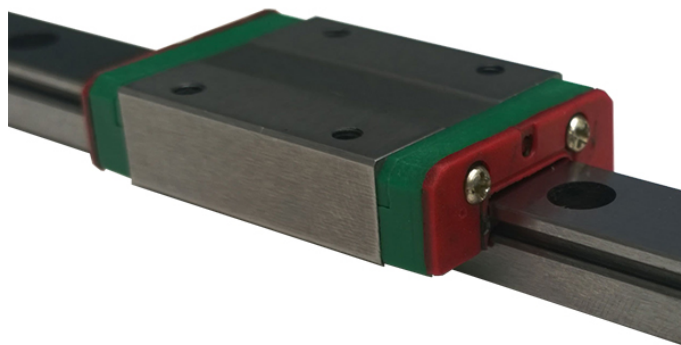
Existuje mnoho typů HotEndů, a proto zde nastává otázka, jaký typ řešení zvolit. V tomto projektu byl zvolen HotEnd s celokovovým tělem a teflonovou vložkou. Při výběru tohoto HotEndu byly vzaty v úvahu jeho vlastnosti:

- Vyšší teplotní rozsah, který umožňuje použít větší škálu vláken.
- Kvalita tisku je vyšší vzhledem k tomu, že HotEnd umožňuje menší tepelnou zónu a tím lepší zatažení vlákna a menší vytékání.
- Většina těchto HotEndů má málo součástí, a proto se snadněji udržují.

2.3.3 Lineární kolejnice

Pohyb efektoru po tiskové ploše zajišťují lineární vedení, které jsou připevněny na jednotlivé osy tiskárny. Existuje zde několik různých mechanismů jako hladké tyče s ložisky, kolečkové vozíky a další. V tomto projektu jsou použity lineární kolejnice zobrazené na obrázku 2.9. Lineární kolejnice používají 15 x 10 mm tlustý ocelový profil s drážkami na každé straně, ve kterých se pohybuje vozík. Kolejnice je konstruována tak, aby bylo možné ji připevnit na rám 3D tiskárny několika šrouby.

Lineární kolejnice jsou velice pevné a můžou poskytnout zvýšenou odolnost rámu tiskárny delta. Tato vlastnost je výhodná pro všechny delta tiskárny větších rozměrů. Na pohyblivou část lineární kolejnice (vozík) jsou připojena delta ramena, která se

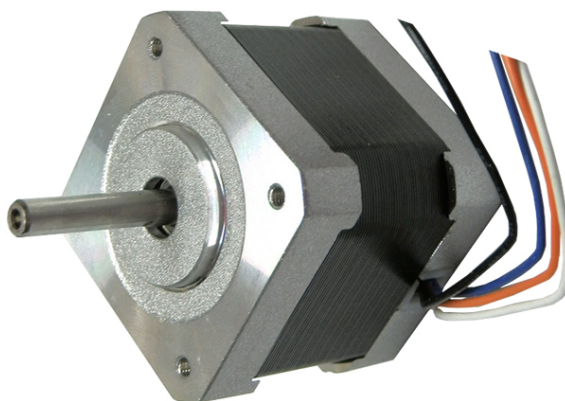


Obr. 2.9: Lineární vedení. [5]

starají o pohyb efektoru. Toto řešení je jedno z nejpřesnějších a nepožaduje žádnou speciální údržbu kromě občasného namazání kolejnice pro hladší pohyb vozíku.

2.3.4 Krokový motor

Krokový motor je speciální typ elektromotoru. Na rozdíl od typického elektromotoru, který roztáčí hřídel, je konstruován tak, aby umožňoval rotaci v obou směrech a částečné (krokové) otáčení v čase. Většina krokových motorů používaných v 3D tiskárnách má minimální úhel otočení (kroku) 1,8 stupně. Obrázek 2.10 znázorňuje typický krokový motor používaný pro 3D tisk.



Obr. 2.10: Krokový motor využívaný pro 3D tisk. [8]

Další vlastností krokových motorů, která je velice užitečná u 3D tiskáren, je schopnost držet nebo opravit rotaci. To znamená, že lze s motorem udělat určitý počet kroků a poté zastavit a držet si dále tuto pozici. Tyto krokové motory mají tzv.

statický moment, který udává, kolik točivého momentu vydrží bez toho, aby se hřídel otočila.

Tiskárny typu delta využívají celkem čtyři krokové motory. První 3 motory se využívají k pohybu v osách X, Y a Z a poslední motor se používá v extrudéru, který dodává vlákno pro HotEnd.

2.3.5 Základní deska

Základní deska může být vyrobena ze skla, dřeva, hliníku nebo kompozitních materiálů. Největší zastoupení mezi těmito deskami představuje sklo. Některé desky obsahují i topný prvek, tzv. vyhřívání základní desky, které je umístěno pod krycím sklem. Vyhřívané desky jsou obvykle požadovány při tisku specifickým vláknem. Na obrázku 2.11 lze vidět základní desku, která je tvořena z desky plošných spojů a obsahuje topné těleso, termistor a tlustou krycí tabuli skla, na kterou je objekt tištěn.



Obr. 2.11: Vyhřívaná základní deska. [9]

2.3.6 Rám

Většina tiskáren typu delta má podobnou konstrukci rámu. Existují zde ale značné rozdíly, z jakých materiálů jsou vyrobeny. Nejvíce využívané jsou kovové nosníky nebo hliníkové profily pro svislé komponenty rámu. Lze najít i tiskárny, které jsou vyrobeny celé ze dřeva včetně rámu tiskárny, ale tento design není běžnou volbou. Delta tiskárny mají dvě základny, ve spodní základně jsou umístěny krokové motory pro osy, napájecí zdroj, elektronika a další. Horní základna obsahuje napínací kladky pro osy a lze zde umístit cívku s vláknem.

Rám použitý v tomto projektu je tvořen z hliníkových profilů 20 x 20 mm a tištěných krajních dílů. Celkové rozměry tiskárny nepřesahují 70 cm na výšku a 30 cm na šířku a zaručují celkovou skladnost takto zvolené konstrukce tiskárny typu delta.

Jelikož se jedná o tiskárnu typu RepRap, lze najít na internetových stránkách Thingiverse¹ mnoho dalších konstrukcí, doplňků, ozdob a vylepšení pro rám tiskárny typu delta.

2.3.7 Elektronika

Elektronika je část hardwaru, která je zodpovědná za čtení G-code souborů a jejich převod na signál, který řídí krokové motory. Dále se stará o potřebné výpočty, měření teploty a sleduje maximální (minimální) polohu efektoru nad základní deskou.

Většina krokových motorů vyžadují speciální desky tzv. krokový ovladač. Některé desky mají již tyto ovladače implementované nebo je používají jako zásuvné moduly. Většina tiskáren typu delta využívá rozšiřující desky (RAMPS, RAMBo, atd.), do kterých se přímo připojují jednotlivé hardwarové komponenty jako teplotní senzory, krokové motory, vyhřívání základní desky, HotEnd a mnoho dalších. Tyto desky jsou přímo připojeny k řídicí jednotce. Jako řídicí jednotka se nejčastěji využívá Arduino Mega, které se stará o všechny potřebné výpočty.

V tomto projektu není použita ovládací ani rozšiřující deska, která je zmíněná výše. Jako hlavní výpočetní jednotka byla zvolena platforma BeagleBone Black, tato platforma je velice podobná mikropočítači Raspberry Pi. Oproti Raspberry Pi obsahuje větší počet GPIO pinů a proto ji lze využít k tomuto řešení. Dále deska obsahuje ethernetový port, díky kterému můžeme docílit síťového tisku za pomoci speciální aplikace. Řešení, popsané výše, potřebuje ke správnému provozu počítač, který přes USB posílá G-code informace do Arduina a to tyto příkazy vykonává. S využitím mikropočítače BeagleBone Black starost potřeby dalších řídicích jednotek odpadá a veškeré operace jsou implementovány v jednom mikropočítači.

2.3.8 BeagleBone Black

Jak již bylo zmíněno, jako hlavní výpočetní jednotka tiskárny byl zvolen mikropočítač BeagleBone Black, který implementuje výpočetní a řídicí jednotku do jedné platformy. Jedná se o vývojovou platformu založenou na procesoru ARM Cortex-A8. Výhodou tohoto mikropočítače je možnost instalace linuxových distribucí jako Debian, Android, Ubuntu a další. Tato skutečnost nám umožňuje instalaci potřebných

¹<http://www.thingiverse.com/>

programů pro správu tiskárny přímo na mikropočítač. Porovnání technických specifikací vývojové desky BeagleBone Black a Arduina Mega je zobrazeno v tabulce 2.1.

Tab. 2.1: Porovnání technických specifikací vývojových desek.

	BeagleBone Black	Arduino Mega
Procesor	AM3358 ARM Cortex-A8 (32-bit)	ATmega2560 (8-bit)
Maximální takt procesoru	1 Ghz	16 MHz
Analogové piny	7	16
Digitální piny	65 (3,3 V)	54 (5 V)
Paměť	512MB DDR3, 2GB integrované úložiště využívající eMMC, microSD slot	EEPROM 4 KB, 256 KB Flash, SRAM 8 KB
USB	USB 2.0	
Video	microHDMI	
Audio	microHDMI	
Podporovaná rozhraní	4 x UART, 8 x PWM, LCD, GPMC, MMC1, 2 x SPI, 2 x I2C, A/D převodník, 4 časové spínače	4 x UART, 15 x PWM, SPI, LCD, I2C, A/D převodník

Rozložení včetně popisu jednotlivých GPIO pinů lze nalézt v příloze A. [10]

3 EXPANZNÍ DESKA

Expanzní deska (zásuvná deska, shield) je nadstavbou nad logickým ovládáním tiskárny, ke kterému jsou připojeny veškeré periferie 3D tiskárny. Desku lze tedy označit jako hardwarový interface, který ovládá jednotlivé funkční prvky tiskárny. Existuje široká škála expanzních desek, které se dají využít pro připojení periférií 3D tiskárny. Většina desek je konstruována pro připojení k platformě Arduino Mega, která je dominantně zastoupena jako logická (výpočetní) část konstruovaných tiskáren.

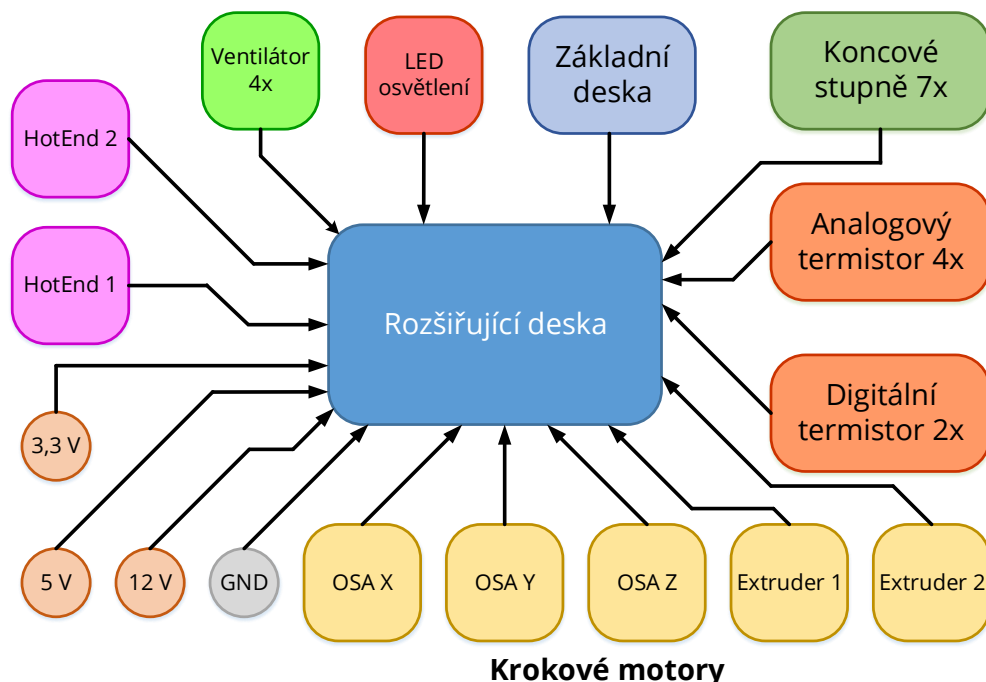
V současnosti pro platformu BeagleBone existuje velice málo komerčních expanzních desek, které jsou pro svoji unikátnost na trhu předraženy. Je možné nalézt desky vyrobené uživateli, kteří implementovali vlastní řešení pro jejich tiskárny a volně je zpřístupnili pro komunitu RepRap. Žádná z těchto desek neobsahuje potřebné vstupně / výstupní piny, proto je nelze využít v této práci.

Tato práce se zabývá výrobou vlastní expanzní desky, která bude kompatibilní s platformou BeagleBone Black. Deska je konstruována jako modulární, výhodou této konstrukce je především snadná výměna a oprava součástí. Lze měnit základní nastavení hardwaru s využitím jumperů a další. Expanzní desku je možné přímo osadit do GPIO pinů na platformě BeagleBone. Takto se lze zbavit nepřehledné a nadbytečné kabeláže při propojování. Výsledná deska bude obsahovat konektory se zámkem pro snadné připojení jednotlivých periférií 3D tiskárny. V tabulce 3.1 jsou uvedeny vstupně / výstupní konektory, kterými je expanzní deska osazena.

Tab. 3.1: Výstupní konektory osazené na expanzní desce.

Konektor	Počet [ks]
Externí napájení 12V	1
Externí napájení 5V	1
Externí napájení 3,3V	1
HotEnd	2
Základní deska	1
LED osvětlení	1
Ventilátor	4
Extrudér	2
Korkový motor	3
Analogový termistor	4
Digitální termistor	2
Koncové stupně	7

Na obrázku 3.1 je zobrazeno blokové schéma výše popsané desky. Blokové schéma je rozděleno do jednotlivých bloků, které jsou níže popsány a je vysvětlena jejich funkcionality.



Obr. 3.1: Blokové schéma expanzní desky.


3.1 Napájení



Expanzní deska neobsahuje vlastní zdroj napájení. Proto je nutné použít externí zdroj, po kterém je požadováno výstupní stejnosměrné napětí 12 V, 5 V a 3,3 V. Tyto vlastnosti dokonale splňuje počítačový ATX zdroj, který je hojně využíván k napájení amatérských 3D tiskáren. Výhoda tohoto zdroje je především v jeho ceně, která se pohybuje pod jedním tisícem korun. Za tuto cenu lze získat zdroj, který bude mít minimální zvlnění výstupního napětí pro jednotlivé větve.




Pro napájení 3D tiskáren jsou také využívány průmyslové zdroje s výstupním napětím 12 V nebo 24 V. Tyto zdroje se využívají pro systémy, které jsou navrhovány pouze na jejich napájení, nebo expanzní desky obsahující usměrňovače a stabilizátory pro jiná napětí. Cena těchto zdrojů je řádově vyšší než u počítačových ATX zdrojů.

V tomto projektu je využit ATX zdroj s výkonem 550 W a jmenovitým proudem 16 A pro 12 V větev. Na obrázku 3.2 je zobrazen štítek, z kterého lze vyčíst ostatní

parametry zdroje. Na zdroj jsou kladené vysoké nároky především pro 12 V větev, která je výkonová. K této větvi jsou připojeny ventilátory, ovladače krokových motorů, vyhřívání základní desky, LED osvětlení a HotEnd. BeagleBone je připojen k 5 V větvi ATX zdroje a nejsou na ni kladeny takové nároky. Expanzní deska obsahuje i konektor pro připojení 3,3 V pro napájení logických obvodů desky. Toto napětí není nutné připojovat, protože ho lze vyvést z GPIO pinů BeagleBone Black. Pokud bude využito interní napájecí 3,3 V větve, je nutno jej na expanzní desce aktivovat pomocí jumperu, který propojuje GPIO pin s 3,3 V větví. Při externím napájení je nutné daný jumper odstranit.

		MODEL: ATX-550WA-14					PFC	
AC INPUT		230V AC / 4A, 47-63Hz						
DC OUTPUT	+3,3V	+5V	+12V1	+12V2	-12V	+5V SB		
	20A	18A	16A	16A	0.3A	2.5A		
	150W		384W		3.6W	12.5W		
	550W							
CAUTION ! HAZARDOUS AREA		Do not remove this cover. Trained service personnel only. No user serviceable components inside.						
VORSICHT ! GEFAHREZONE		Gehäuse unter keinen Umständen öffnen. Reparaturen nur durch Fachpersonal.						
VAROVÁNÍ !		Nedemontujte kryt zdroje. Nebezpečí úrazu elektrickým proudem. Opravu přenechte odbornému servisu.						
ВІСТРАХА !		Недобрерайте крик, абы сте забранілі электрычным шоку.						
ВЫСТРАХА !		Сервіс прызначае кваліфікаванаму сервіснэму персанэлу.						





Obr. 3.2: Informační štítek ATX zdroje.

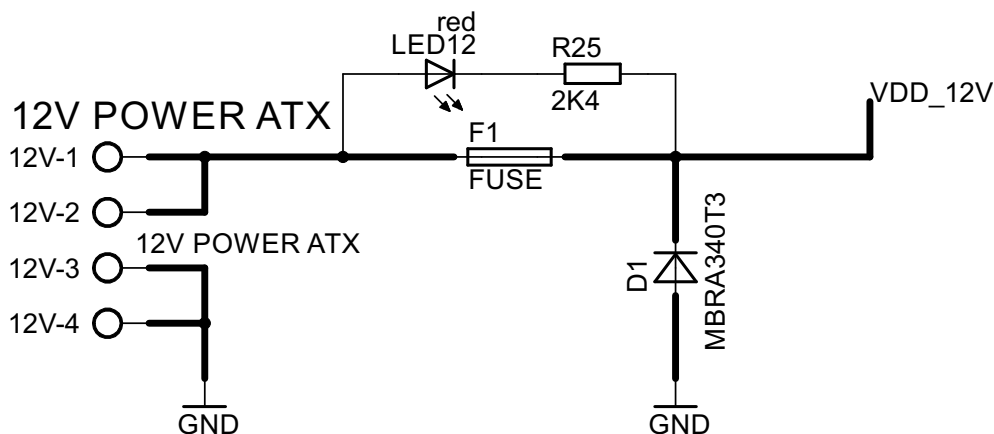
Největší nároky na zdroj jsou kladeny při zahájení tisku, kdy je zapotřebí zahřát základní desku a HotEnd na požadovanou teplotu. V tabulce 3.2 jsou uvedeny výkony jednotlivých prvků 3D tiskárny a celkový potřebný výkon pro 12 V větev. Uvedené výkony jsou brány jako maximálně možné pro každý prvek tiskárny. Celkový výkon pro 12 V větev je vypočítán na 382,5 W. Přidáním dostatečné rezervy lze využít počítačový ATX zdroj s výkonem 550 W. Jmenovitý proud by při takovéto zátěži dosahoval hodnoty 32 A, ale této hodnoty se v reálných podmínkách nelze přiblížit. Při zahájení tisku je aktivní pouze základní deska, HotEnd, popřípadě je zapnuto osvětlení. Tato předtisková příprava tiskárny (zahřátí tiskárny) má v průběhu tisku největší proudový odběr, který je roven maximálně 18,75 A. V průběhu tisku se již tiskárna nemusí zahřívat, ale pouze se teplota udržuje, čímž klesají nároky na proudový odběr z 12 V větve.

Na obrázku 3.3 je zobrazeno zapojení 12 V větve na expanzní desce. Tato větev je dimenzována na maximální proudovou zátěž 22 A a je doplněna pouzdem pro osazení autopojistky. Pouzdro je určeno pro pojistky typu standard s maximální (doporučenou) hodnotou pojistky 20 A. Dále obvod obsahuje diodu D1, která chrání zapojení proti přepólování a LED diodu LED12, která signalizuje připojení napájení

Tab. 3.2: Výkon jednotlivých periférií 3D tiskárny.

Periferie	Výkon
HotEnd	50 W
Základní deska	150 W
5x Ventilátor	7,5 W
5x Ovladače krokového motorku	150 W
LED osvětlení	25 W
	382,5 W

z ATX zdroje. Zapojení 5 V a 3,3 V větve expanzní desky je totožné s 12 V větví. Pouze u těchto větví není osazena pojistka, protože zde nejsou očekávány velké proudové odběry jako u 12 V větve.

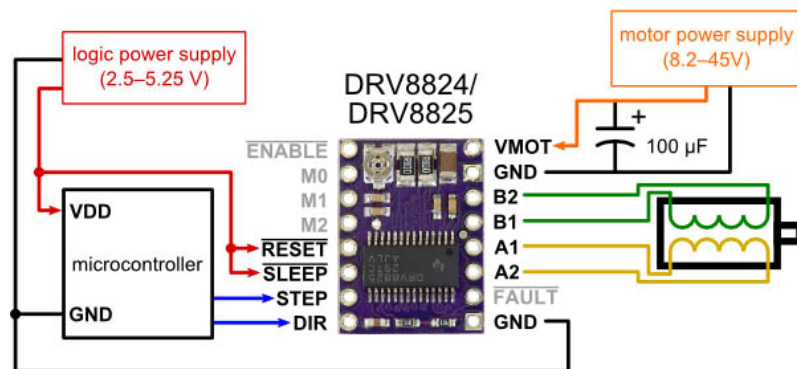


Obr. 3.3: Zapojení 12 V napájecí větve expanzní desky.

3.2 Ovladače krokových motorů

Ovladače krokových motorů byly zvoleny DRV8825 od společnosti Pololu. Tyto ovladače byly zvoleny z důvodu nastavování většího rozsahu velikosti kroků u krokového motoru. Ovladač DRV8825 dovoluje nastavit velikost kroku na hodnotu $1/32$ oproti jiným komerčním ovladačům, které umožňují pouze hodnotu $1/16$. To nám umožňuje zvýšit přesnost při tisku detailních nebo malých předmětů a celkového tisku. Na obrázku 3.4 je zobrazeno doporučené zapojení ovladače dle výrobce.

Vstupní napájení motorů je připojeno na 12 V větev, která zaručí maximální proudový odběr ovladače (2 A). Elektrolytický kondenzátor byl nahrazen za tan-



Obr. 3.4: Blokové schéma zapojení ovladače krokového motoru DVR8825 doporučené výrobcem. [14]

talový z důvodu osazení na expanzní desku pod ovladač DRV8825. V pracovním režimu se ovladač zahřívá a může dosahovat vysokých teplot, které lze eliminovat přidáním pasivního chladiče na čip ovladače. Z těchto teplotních důvodů byl zvolen právě tantalový kondenzátor, který má širší škálu pracovních teplot než elektrolytický. Porty STEP a DIR se ovládá počet kroků a směr otáčení motorů. Tyto porty jsou připojeny přímo k GPIO pinům BeagleBone. Připojením logické úrovně 0 na pin ENABLE je povoleno ovládání krokového motoru. Logickou 1 je ovládání krokového motoru vypnuto. Jak již bylo zmíněno výše, ovladač krokových motorů DRV8825 umožňuje nastavovat velikost jednoho kroku v rozmezí $1 - 1/32$. Toto nastavení lze realizovat pomocí pinů M0 (MODE0) až M2 (MODE2), které je zobrazeno v tabulce 3.3. Velikost kroku je nastavena připojením logické 1 nebo 0 na piny M0 až M2. Aby bylo možné nastavení kroků jednoduše měnit, je expanzní deska osazena třípólovým kódovým spínačem umístěným pod samotným ovladačem krokového motoru. [13]

Tab. 3.3: Formát nastavení velikosti jednoho kroku na ovladači DVR8825. [13]

MODE2	MODE1	MODE0	Mód kroku
0	0	0	Plný krok
0	0	1	1 / 2 kroku
0	1	0	1 / 4 kroku
0	1	1	8 mikrokroků / krok
1	0	0	16 mikrokroků / krok
1	0	1	32 mikrokroků / krok
1	1	0	32 mikrokroků / krok
1	1	1	32 mikrokroků / krok

3.3 MOSFET ovladače

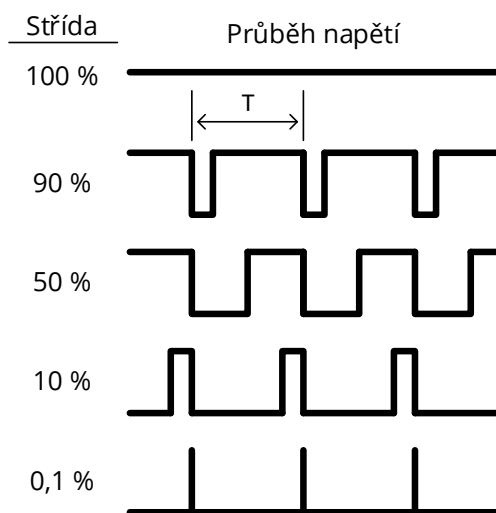
Expanzní deska je osazena osmi tranzistory typu MOSFET. Tyto tranzistory je potřeba ovládat, proto jako ovládací prvek těchto tranzistorů byl zvolen PWM kontrolér PCA9685. Zvolený kontrolér pro řízení MOSFET tranzistorů využívá pulzně šířkovou modulaci (PWM).

3.3.1 Pulzně šířková modulace

Pulzně šířková modulace (PWM) je diskrétní modulace pro přenos analogového signálu pomocí dvoustavového signálu. Za dvoustavovou veličinu může být použito například elektrické napětí, proud či další fyzikální veličiny. V tomto případě je využíváno pro přenos informace napětí, kde přenášený signál nese informaci o hodnotě, která nabývá stavů logické 1 nebo logické 0. Hodnota přenášených informací je zakódována jako poměr mezi stavy logické 1 a logické 0. Tomuto poměru se říká střída, její výpočet je uveden ve vzorci:

$$D = \frac{\tau}{T} \times 100 [\%].$$

Kde T udává periodu signálu a τ udává dobu trvání logické jedničky. Pokud výsledek vynásobíme stem, je střída vyjádřena procentuálně. Na obrázku 3.5 jsou znázorněny možnosti nastavení střídy.



Obr. 3.5: Možnosti nastavení velikosti střídy u PWM.

3.3.2 I2C sběrnice

Sběrnice I2C využívá pro komunikaci pouze dva vodiče, sériový hodinový (SCL) a sériový datový (SDA) kanál. To znamená, že se jedná o synchronizovaný přenos dat pouze v jednom směru (poloduplexní komunikace). V daném okamžiku existuje pouze jedno vysílající zařízení a libovolný počet zařízení (většinou jen jedno), která data přijímají. Každé zařízení, připojené na tuto sběrnici, je softwarově adresovatelné jednou unikátní adresou pro celý systém a v každou chvíli existuje jednoduchý vztah master/slave (řídící/řízený) obvod. Masterem se stává obvod, jestliže zahajuje přenos dat po sběrnici a generuje hodinový signál. V tomto čase jsou chápána ostatní zařízení jako slave. Master může operovat jako vysílač či přijímač. Jde o pravou sběrnici typu multi-master se zabudovanou detekcí kolizí či více obvodů, které vysílají v jednom okamžiku. Počet zařízení, připojitelných na sběrnici, je omezen maximální kapacitancí sběrnice a počtem využitelných adres. [12]

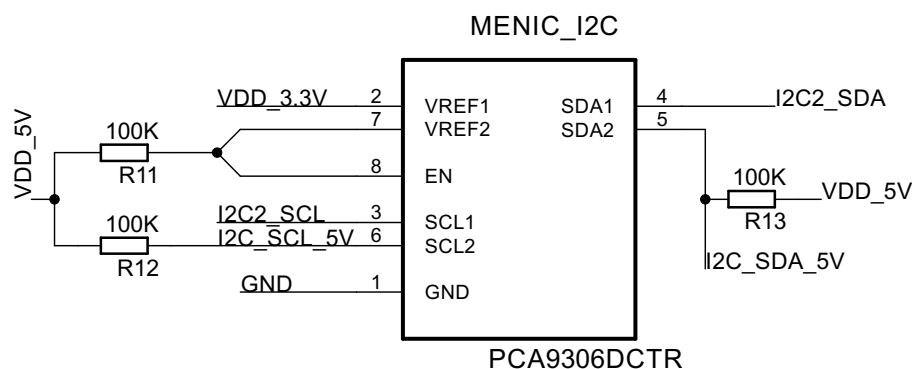
3.3.3 I2C měnič úrovní

Pro ovládání MOSFET tranzistorů je využit PWM driver, který je ovládán přes sběrnici I2C. BeagleBone Black obsahuje dvě oddělené sběrnice, které mají napěťovou úroveň 3,3 V. Tato úroveň napětí není pro ovládání tranzistorů dostačující, proto se zde musí použít I2C měnič napěťových úrovní z 3,3 V na 5 V. Tímto napětím lze tranzistor otevřít s dostatečnou rezervou pro řízení výkonových zařízení 3D tiskárny.

Jako měnič napěťových úrovní byl použit čip PCA9306, který má 2-bitový obousměrný měnič pro I2C datové linky SDA a SCL. Tento měnič má velice malé zpoždění, které nepřesahuje 1,5 ns pro standardní a fast mód sběrnice I2C. Povoluje převod napěťových úrovní od 1,2 V až do 5 V, které jsou na výstupu požadovány. Čip obsahuje pin enable (EN), který při připojení logické 1 zapíná měnič úrovní a povoluje oboustranný přenos mezi datovými linkami SDA, SCL. Když je na pin EN přivedena logická nula, je čip PCA9306 ve vypnutém stavu. Zapojení tohoto měniče úrovní je zobrazeno na obrázku 3.6. [15]

3.3.4 PWM driver

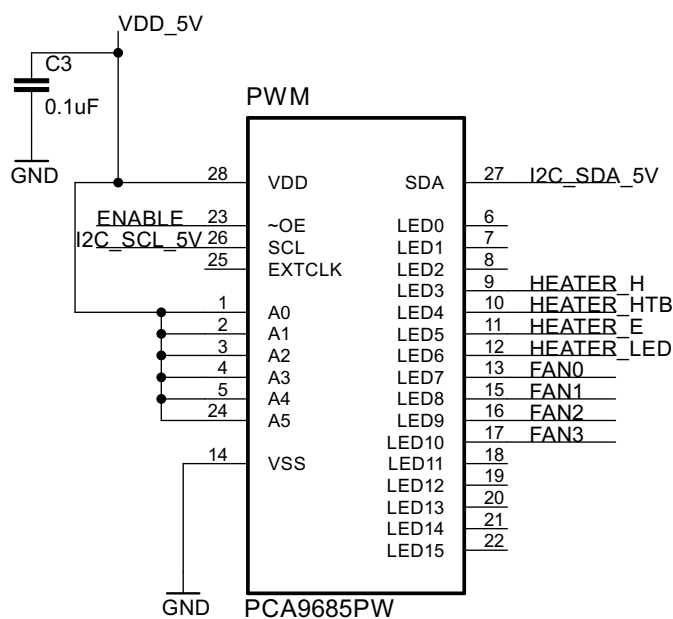
Jako řídící prvek všech MOSFET tranzistorů pro ovládání výkonových periférií 3D tiskárny a ovládání ventilátorů byl zvolen driver PCA9685. Jedná se o 16 kanálový ovladač svitu LED diod, který je řízený mikrokontrolérem (BeagleBone Black) přes I2C sběrnici. Tento driver umožňuje pro každý výstup 12 bitové rozlišení (4096 kroků), programovatelné nastavení frekvence od 24 Hz až do 1526 Hz s možností



Obr. 3.6: Zapojení měniče I2C úrovní PCA9306 na expanzní desce.

nastavení střídý signálu od 0 % do 100 %. S volbou tohoto nastavení jsou všechny výstupy nastaveny na stejnou PWM frekvenci a není možné měnit frekvenci pro každý pin zvlášť. Nelze tedy nastavit dva PWM signály o dvou různých frekvencích. Změna nastavení frekvence se provádí nastavením děličky (prascaleru), jedná se o konstantu, pomocí které se dělí frekvence vnitřního oscilátoru, který má frekvenci 25 MHz. Driver obsahuje pin, pro možnost připojení externích hodin, s frekvencí nepřesahující 50 MHz. PWM driver umožňuje vypínat / zapínat jednotlivé výstupní piny a nastavovat vlastní hodnotu střídý. [18]

S těmito vlastnostmi můžeme tento PWM LED driver využít i pro řízení MOS-FET tranzistorů. Zapojení driveru PCA9685 je zobrazeno na obrázku 3.7.

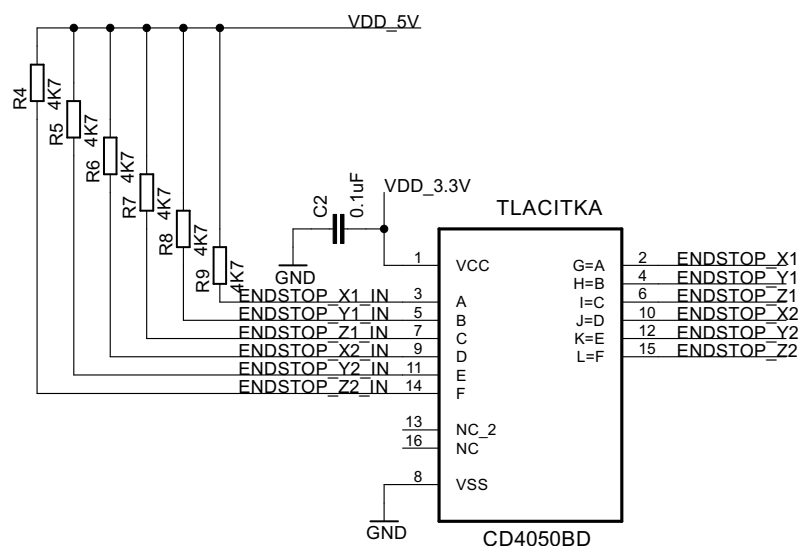


Obr. 3.7: Zapojení PWM LED driveru PCA9685 na expanzní desce.

3.4 Koncové stupně

Pro kontrolu pohybu vozíků po jednotlivých osách 3D tiskárny jsou velmi důležité koncové stupně (spínače), které kontrolují maximální nebo minimální pozici. Maximální možná pozice vozíku (nejvyšší bod na ose) je hlídána z důvodu vyjetí z kolejnice a rozbití ložiskového systému vozíku. Minimální úroveň vozíku (nejnižší možný bod na ose) je hlídána z důvodu rozbití skleněné tiskové plochy hrotem HotEndu.

Tyto úrovně jsou řešeny spínacími prvky, které při sepnutí informují program o dosažení maximální nebo minimální polohy a zakáže jej. Na obrázku 3.8 je zobrazeno schéma zapojení spínacích tlačítek pomocí obvodu CD4050BD. Tento obvod zabraňuje zákmitu při stisku tlačítka a zaručí okamžité vypnutí pohybu vozíku v daném směru. [17]



Obr. 3.8: Zapojení obvodu CD4050BD pro ovládání koncových stupňů na expanzní desce.

3.5 Teplotní senzory

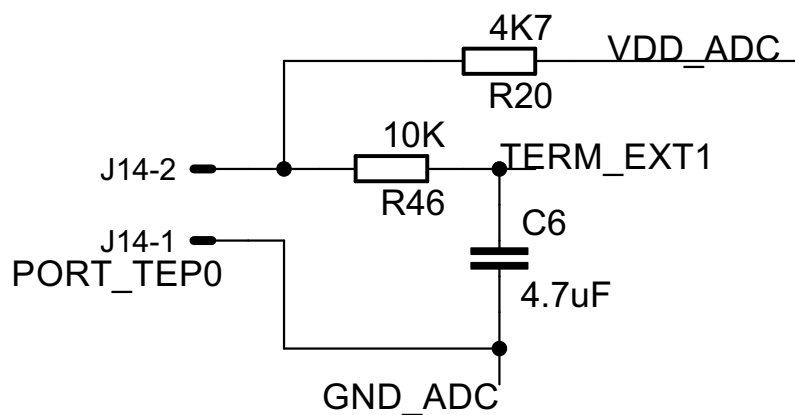
Expanzní deska obsahuje čtyři konektory pro připojení analogových termistorů a dva konektory pro připojení digitálních teplotních čidel Dallas DS18B20.

3.5.1 Termistor 100K

Většina 3D tiskáren RepRap využívá těchto typů termistorů, kterými se měří teplota HotEndu. Jako druhá, či další možnost využití, je měření teploty základní desky.

Výhoda těchto termistorů je v možnosti měření vysokých teplot v rozsahu od $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+250\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tyto teploty lze měřit díky skleněnému zapouzdření odporového prvku, který dokáže odolat vysokým teplotám.

Termistory jsou rezistory, které mění svojí rezistenci v závislosti na změně teploty. Za ideální termistor lze považovat takový, který má přesně známou hodnotu odporu pro aktuální teplotu měřeného prostředí. Termistory lze rozdělit na dva základní druhy. První druh termistoru má kladný teplotní součinitel (PTC), který udává, že s rostoucí teplotou se zvyšuje rezistence termistoru. Druhý druh termistoru má záporný teplotní součinitel (NPC), kde se zvyšující teplotou rezistence termistoru klesá. Teplotní charakteristika těchto termistorů není v reálných podmínkách lineární, převodní tabulku měřených hodnot lze nalézt v dokumentaci pro daný termistor. Zapojení tohoto typu termistoru je zobrazeno na obrázku 3.9.



Obr. 3.9: Zapojení analogového termistoru 100 K na expanzní desce.

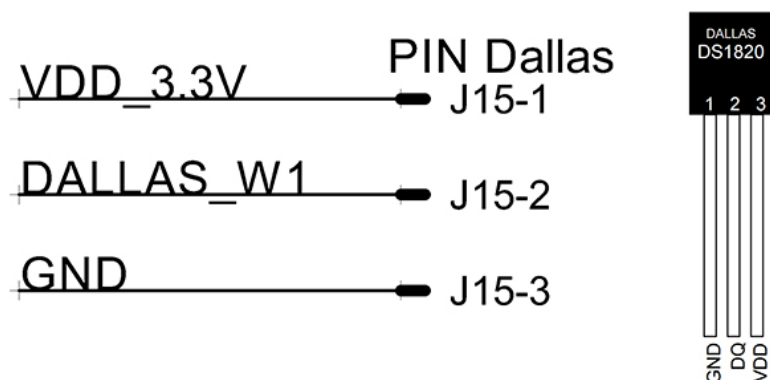
V tomto projektu jsou využity NPC termistory, které se v praxi využívají nejčastěji. U těchto rezistorů se neměří odpor přímo, ale využívá se předřadného odporu s přesně definovanou hodnotou a měří se napětí (potenciál) mezi těmito odpory. Na obrázku 3.9 je zobrazeno schéma zapojení termistoru pro měření teploty HotEndu, na kterém je odpor R20 a termistor připojen mezi napájení ($V_{dd} = 5\text{ V}$) a zemí. Tyto dva odpory jsou zapojeny jako dělič napětí, mezi kterými je napětí děleno dle vztahu:

$$U_2 = U \times \frac{R_2}{R_1 + R_2}.$$

Odpor R46 slouží jako proudové omezení a kondenzátor vyhlazuje nerovnosti napětí. Výsledná hodnota teploty se vypočítá jako poměr mezi referenčním napětím ($V_{ref} =$ vstupnímu napětí V_{dd}) a výstupním napětím na odporovém děliči V_{out} (TERM_EXT1). [8][4]

3.5.2 Teplotní senzor Dallas DS18B20

Jedná se o digitální teplotní senzor, který má měřitelný teplotní rozsah od -55°C do $+125^{\circ}\text{C}$, s garantovanou přesností $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ v rozsahu teplot -10°C až $+85^{\circ}\text{C}$ a poskytuje 9 až 12 bitovou přesnost při měření teploty. Tento senzor komunikuje přes sběrnici 1-Wire, která ze své podstaty požaduje pouze jednu datovou linku (a zem) pro komunikaci s centrální řídicí jednotkou. Každý senzor má jedinečnou 64 bitovou adresu, která umožňuje připojit na jednu 1 Wire sběrnici až 127 zařízení (maximální počet podporovaný sběrnici). Zapojení teplotního senzoru DS18B20 a jeho vizuální podoba je zobrazena na obrázku 3.10. [16]



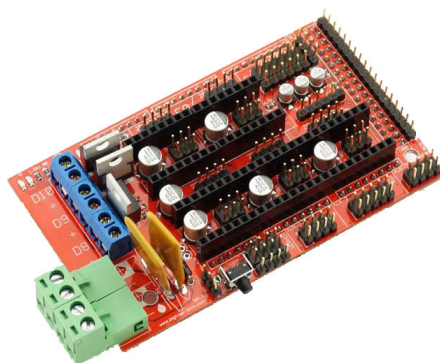
Obr. 3.10: Zapojení digitálního teplotního čidla Dallas DS18B20 na expanzní desce a jeho vizuální podoba. [16]

Expanzní deska je osazena 2 konektory pro připojení dvou nezávislých sběrnic pro tato teplotní čidla. Tímto lze dosáhnout připojení až 254 teplotních čidel. Počet možných připojených čidel je značně naddimenzován, ale s počtem volných GPIO pinů bylo zvoleno toto řešení.

3.6 Porovnání s expanzní deskou Ramps 1.4

Většina 3D tiskáren, které využívají jako hlavní řídicí jednotku platformu Arduino, jsou osazeny expanzní deskou Ramps 1.4. Tato deska je modulárně konstruována a je označována jako nízkonákladová, protože její cena nepřesahuje 500 Kč. Dají se zakoupit i daleko levnější desky, například přes aukční portál eBay. Výhodou této desky je její jednoduchost. Deska neobsahuje žádné zbytečné rozhraní či konektory. Obsahuje pouze rozhraní, které bude běžný uživatel pro funkci 3D tiskárny potřebovat. Ale pokud uživatel bude chtít připojit jiné rozhraní, například pro ovládání osvětlení, měření teploty a jiné, bude nucen si koupit desku novou, nebo si vyrobit desku vlastní, aby splňovala veškeré jeho požadavky.

Další výhoda této desky je, že Arduino má 5 V logiku vstupně / výstupních pinů. Díky této logice není zapotřebí využívat žádné měniče úrovní, jako je tomu u expanzní desky vytvářené v tomto projektu. Nevýhoda této desky je v osazování novými perifériemi, které nejsou definované v softwaru. Tyto desky již mají předpřipravený software na řízení tiskárny a při jakékoliv úpravě kódu se zvyšuje riziko chyby a z toho plynoucí nefunkčnost tiskárny, nebo procházení tisíce řádků kódu pro přidání nové periferie. Expanzní deska Ramps 1.4 pro platformu Arduino je zobrazena na obrázku 3.11. [8]



Obr. 3.11: Expanzní deska Ramps 1.4. [8]

Expanzní deska vytvořená v toto projektu má oproti Ramps 1.4 řadu výhod. Umožňuje připojení až 4 výkonových zařízení řízených MOSFET tranzistory, připojení 4 analogových termistorů typu 100 K a až 254 digitálních teplotních čidel DS18B20. Možnost připojení až 4 řízených ventilátorů pro lepší cirkulaci vzduchu a chlazení tisknutého modelu. Porovnání jednotlivých rozhraní a vlastností desky je uvedeno v tabulce 3.4.

Tab. 3.4: Porovnání rozhraní a vlastností mezi Ramps 1.4 a expanzní deskou tohoto projektu. [8]

Rozhraní a vlastnosti desky	Expanzní deska	Ramps 1.4
Externí napájení 12V	Ano	Ano
Externí napájení 5V	Ano	Ne
Externí napájení 3,3V	Ano	Ne
Pojistka proti přetížení	Ano	Ne
Počet řízených výkonových MOSFET	4	3
Počet řízených ventilátorů	4	1
Počet analogových termistorů	4	3
Počet digitálních termistorů	až 254	0
Počet ovladačů krokového motoru	5	5
Počet koncových stupňů	6	6
Možnost automatické kalibrace	Ano	Ano
Externí I2C sběrnice	Ano	Ano
Připojení displeje	Ne	Ano

4 SOFTWARE

Cesta od samotného vytvoření modelu v návrhovém programu až k samotnému tisku vyžaduje dva základní softwarové kroky, než daný objekt 3D tiskárna vytiskne. V prvním kroku dojde k vytvoření (vymodelování) objektu a exportování do souboru s koncovkou `.stl`. Dále v druhém kroku je potřeba převést `.stl` soubor do souboru G-code, který umí zpracovat firmware tiskárny a ovládá jednotlivé periferie připojené přes expanzní desku.

Existuje mnoho různých softwarových řešení pro výše popsané kategorie. V následujících podkapitolách budou popsány jednotlivé softwarové řešení pro každý krok přípravy tisku.

4.1 Computer Aided Design

Computer Aided Design (CAD) lze do češtiny přeložit jako počítačem podporované kreslení. Jde o software, který umožňuje vytvoření objektu pomocí grafických programů pro projektování. CAD aplikace vždy obsahují grafické, geometrické, matematické a inženýrské nástroje pro kreslení plošných výkresů a modelování objektů. Díky tomu lze objekt realizovat v různých prostorových zobrazeních a manipulovat s ním (změna velikosti, otáčení, atd.).

Existuje mnoho CAD softwarů, které umožňují využití velkou škálu funkcí. Pro použití s 3D tiskárnou je zapotřebí, aby software umožňoval navrhovat objekty ve třech rozměrech, definovat interiérové prvky, jako jsou různé otvory, díry, funkce pro zkosení či zaoblení povrchu a další. Důležitou funkcí je podpora ukládání již vytvořených objektů do datových formátů, které jsou podporovány dalšími programy pro přípravu tisku (datový formát `.stl`). Toto kritérium omezuje využití některých CAD softwarů, ale většina z nich tyto datové formáty podporuje.

Při výběru správného CAD softwaru lze nalézt licencované nebo OpenSource aplikace, které jsou zdarma, ale jejich nevýhoda může být v možnosti omezení některých funkcí, které je nutno dokoupit. Většina z těchto aplikací disponuje grafickým uživatelským rozhraním (GUI), ve kterém si lze prohlížet modelovaný objekt. Některé z těchto aplikací mohou vyžadovat složité ovládání a je nutná dlouhá doba k učení se jejich ovládání. Obecně lze říci, čím více funkcí a možností daná aplikace nabízí, tím obtížnější bude se s ní naučit pracovat. V tabulce 4.1 je uvedeno několik oblíbených CAD aplikací v komunitě uživatelů RepRap. Veškeré tyto aplikace umožňují exportovat vytvořený model do datového formátu `.stl`, který je nutný pro další zpracování pro přípravu 3D tisku.[1][2]

Tab. 4.1: Srovnání CAD aplikací pro tvorbu 3D modelů. [1]

Název	Adresa (URL)	Licence	Uživatelské rozhraní	Obtížnost
Blender	www.blender.org	OpenSource	GUI	Vysoká
123D (Autodesk)	www.123dapp.com	Zdarma, Placená	Web / GUI	Vysoká
Inventor (Autodesk)	www.autodesk.com	Placená	GUI	Vysoká
SketchUp	www.sketchup.com	Zdarma, Placená	GUI	Střední
FreeCAD	www.freecadweb.org	OpenSource	GUI	Střední
ThinkerCAD	www.tinkercad.com	Zdarma, Placená	Web	Lehká

4.2 Computer Aided Manufacturing

Computer Aided Manufacturing (CAM) lze do češtiny přeložit jako počítačově řízená výroba. CAM software má za úkol přijmout a zpracovat definici modelu (soubor `.stl`) a převést jej do souboru, který bude obsahovat instrukce pro tiskárnu, jak daný objekt vytisknout a to vrstvu po vrstvě (soubor `.gcode`). CAM aplikace daný objekt rozdělí na jednotlivé vrstvy a uloží jej do souboru instrukcí G-code, které firmware 3D tiskárny umí zpracovat.

Může zde nastat otázka, co to vlastně G-code znamená? G-code je zkrácený zápis pro sadu strojových instrukcí, které řídí pohyb jednotlivých částí daného zařízení. Tyto kódy nejsou omezeny pouze na 3D tiskárny, ale mají širší základnu včetně CNC stojů a dalších zařízení. S rozvojem 3D tisku byl G-code upraven tak, aby zahrnoval nové kódy a možnosti specializované pro 3D tisk.

Tyto kódy jsou tvořeny písmenem, které označuje definovanou třídu příkazu, číslem (indexem) a jedním nebo více parametry, které jsou odděleny mezerami (mezery jsou nepovinné). Jsou zde definovány kódy pro umístění HotEndu, nastavení teploty, pohyb jednotlivých os a mnoho dalších. V tabulce 4.2 je zobrazeno několik příkladů těchto kódů a ve výpisu 4.1 je zobrazen krátký výňatek z `.gcode` souboru. První řádky souboru obsahují středníky, které označují komentář. Tyto komentáře se využívají pro popis základních informací o tisknutém objektu. Pomocí těchto komentářů lze zjistit tyto informace bez nutnosti zpětného překladu souboru.

Při výběru správného CAM softwaru, lze najít různé druhy, které se liší v imple-

Tab. 4.2: Příklady příkazů G-code.[1][2][8]

Kód	Popis	Parametry	Příklad
G1	Posun do nové pozice	X, Y, Z souřadnice a rychlost pohybu	G1 X20 Y35 Z5 F5000
G28	Nastav domovskou pozici	Žádné	G28
M84	Vypnout motory	Žádné	M84
M104	Nastav teplotu na HotEndu	Teplota v °C	M104 S220
M105	Získej teplotu HotEndu	Žádné	M105
M106	Zapni ventilátor	Rychlost (0 - 255)	M106 S160
M114	Získej pozici všech os	Žádné	M114

mentaci jednotlivých funkcí, uspořádání zobrazení, definice parametrů a další. Bez ohledu na tyto vlastnosti všechny tyto CAM aplikace fungují na stejném základním principu. Po instalaci zvolené CAM aplikace lze načíst již vytvořený `.stl` soubor s vymodelovaným objektem. Po načtení objektu je automaticky umístěn do středu základní desky, či je možnost změnit jeho pozici. Většina těchto aplikací umožňuje přidávání více objektů na tiskovou plochu, čímž je tyto objekty možné tisknout najednou. Důležitou vlastností těchto aplikací je nastavení vlastností tisku, jako jeho kvalita, vlastnosti vrstev, vyhřívání, chlazení, výplň objektu a další. Po nastavení jednotlivých vlastností objektu lze vytvořit výsledný `.gcode` soubor a přejít k samotnému tisku. [1][2]

Listing 4.1: Zobrazení krátkého výňatku ze souboru G-code.

```
; generated by Slic3r 1.2.9 on 2016-05-22 at 22:46:42

; external perimeters extrusion width = 0.26mm
; perimeters extrusion width = 0.20mm
; infill extrusion width = 0.40mm
; solid infill extrusion width = 0.24mm
; top infill extrusion width = 0.24mm

M190 S110 ; set bed temperature
M104 S230 ; set temperature
G28 ; home all axes
G1 Z5 F5000 ; lift nozzle

M109 S230 ; wait for temperature to be reached
G21 ; set units to millimeters
```

```

G90 ; use absolute coordinates
M82 ; use absolute distances for extrusion
G92 E0
M106 S153
G1 E-2.00000 F3000.00000
G92 E0
G1 Z0.200 F4200.000
G1 X15.912 Y-17.342 F4200.000
G1 E2.00000 F3000.00000
M204 S200
G1 X17.342 Y-15.912 E2.03720 F1500.000
G1 X17.342 Y15.912 E2.62238
G1 X15.912 Y17.342 E2.65959
G1 X-15.912 Y17.342 E3.24477
G1 X-17.342 Y15.912 E3.28197
G1 X-17.342 Y-15.912 E3.86715
G1 X-15.912 Y-17.342 E3.90435
G1 X15.852 Y-17.342 E4.48843

```

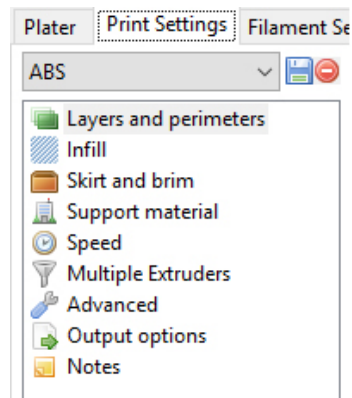
Další důležitou vlastností při výběru CAM softwaru je vybrat takovou aplikaci, která bude podporovat tisk s delta tiskárnami. Ne všechny dostupné aplikace toto nastavení podporují. Nejvíce oblíbenou aplikací v komunitě RepRap a také využívanou v tomto projektu je aplikace Slic3r.

4.2.1 Slic3r

Jak již bylo zmíněno, tato CAM aplikace se těší velké oblibě v RepRap komunitě, které nabízí jednoduchý nástroj na nastavování vlastností a kvality tisku. Výhoda této aplikace je v podpoře všech druhů tiskáren, které právě komunita RepRap zaštiťuje. V příloze je zobrazena hlavní stránka aplikace, na které lze nalézt základní desku předdefinované tiskárny. Ovládání aplikace a nastavování jednotlivých vlastností je intuitivní i bez přečtení přiložené dokumentace. Obrázek 4.1 popisuje nejdůležitější nabídku aplikace pro volbu vlastností a kvality tisku. [20]

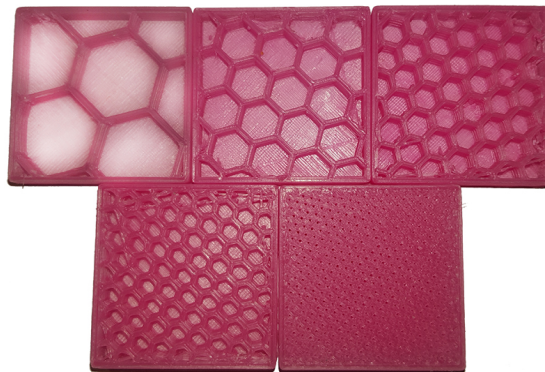
V těchto položkách lze nastavovat tyto vlastnosti:

- **Layers and perimeters:** nastavení šířky jedné vrstvy a počet plně vyplněných spodních a horních vrstev objektu pro jeho větší pevnost,
- **Infill:** možnosti pro definování výplně objektu, pro lepší představu jsou na obrázku 4.2 vytištěné objekty o hodnotách výplně 5 %, 10 %, 15 %, 20 %, 50 %, 100 %



Obr. 4.1: Nabídka nastavení kvality tisku v CAM aplikaci Slic3r. [20]

- **Skirt and brim:** nastavení šířky tisknutého okraje objektu pro první vrstvu, tím je docíleno vyšší stability na základní desce,
- **Support material:** povolení a zakázání tisku podpěr, například při tisku oblouku atd.,
- **Speed:** nastavení rychlosti pohybu pro HotEnd v závislosti na tištěných částech objektu (okraj, výplň, podpěry a další).



Obr. 4.2: Příklady tisku výplně objektu v pořadí 5 %, 10 %, 15 %, 20 %, 50 %.

4.3 Firmware

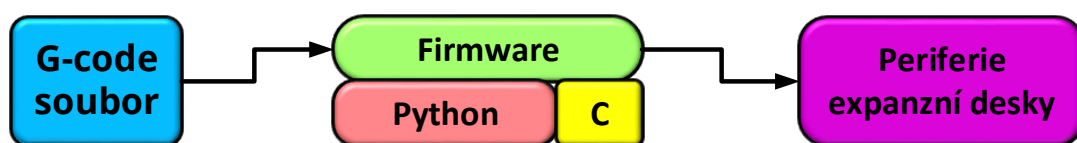
Firmware je hlavní softwarovou řídicí jednotou 3D tiskárny a je zodpovědný za čtení souboru G-code a umožňuje interpretaci těchto kódů pro jednotlivé periferie tiskárny, jako jsou regulace teploty, nastavení pozic HotEndu a další.

Existuje mnoho OpenSource firmwarů pro 3D tiskárny, které se dají zdarma stáhnout z internetu a obsahují podrobnou dokumentaci. Jejich výhodou je v podpoře velké škály uživatelů 3D tiskáren a neustálé vylepšování. Nevýhodou nastává

v okamžiku, když není jako výpočetní platforma využito Arduino, ale jiný hardware, například BeagleBone či Raspberry Pi a další. Tyto firmwary jsou napsány pouze pro platformu Arduino a s ostatními platformami jsou nekompatibilní. Na internetu lze nalézt malé skupinky nadšenců, kteří se tímto řešením zabývají a vytváří si vlastní firmware.

V tomto projektu byl jako hlavní výpočetní jednotkou zvolen mikropočítač Beagle Bone Black. Pro tuto platformu existuje velmi malé množství firmwaru a navíc pokud nějaký existuje, pracuje pouze z vybranými typy expanzních desek. Výhoda této platformy je v široké podpoře programovacích jazyků pro napsání firmwaru tiskárny nebo jejich kombinací. Většinou se využívá programovací jazyk Python, který bývá doplněný z malé části jazykem C. Na tuto platformu lze nainstalovat plnohodnotný operační systém Linux, v tomto případě byl vybrán systém Debian. Možnost instalace linuxových distribucí na Beagle Bone umožňuje využít tuto platformu nejen jako výpočetní zařízení, ale také jako síťový ovladač tiskárny, server pro připojení web kamery sledující aktuální stav tištěného objektu a další funkce, které platformy jako Arduino nepodporují.

Firmware, který se stará o ovládání expanzní desky vyrobené v tomto projektu, je kombinací volně dostupných systémů pro platformy Raspberry Pi a BeagleBone. Jelikož každá deska je unikátní, bylo zapotřebí přeprogramovat přístupy k jednotlivým logickým obvodům expanzní desky, ovládání pohonu krokových motorků, ovládání MOSFET tranzistorů přes PWM Led driver a jiné. Blokové schéma firmwaru na platformě BeagleBone je zobrazeno na obrázku 4.3. Ukázky zdrojových kódů jsou uvedeny v příloze D. [1]



Obr. 4.3: Blokové schéma firmware na platformě BeagleBone Black.

4.4 Síťové ovládání 3D tiskárny

Jak již bylo zmíněno, platforma BeagleBone umožňuje podporu vzdáleného tisku. Pod pojmem vzdálený tisk se rozumí připojení 3D tiskárny do místní LAN sítě

prostřednictvím kabelu nebo bezdrátovým připojením (Wi-Fi). Připojením tiskárny do LAN sítě, popřípadě internetu, lze získat schopnost ovládání a sledování stavu tiskárny odkudkoliv, kde se lze připojit k internetu.

4.4.1 OctoPrint

Softwarovou aplikaci OctoPrint lze označit jako rozhraní mezi 3D tiskárnou a uživatelem. Jedná se o webový tiskový server, který umožňuje na dálku ovládat a řídit tiskárnu. Nejedná se zde o CAM aplikaci, ale pouze o dálkové ovládání tiskárny. Tato aplikace umožňuje nahrávat již vytvořené G-code soubory prostřednictvím webového rozhraní, vytvářet databázi modelů a provádět jejich tisk. Po připojení webové kamery lze sledovat video z tiskového procesu nebo po nastavení určitého časového intervalu zobrazovat fotografie tisku.

Přístup na webový server je opatřen uživatelským účtem, který zabezpečuje tiskárnu před zneužitím nepovolanou osobou, pokud je tiskárna připojena do internetu. Před samotným tiskem je zapotřebí nahrát G-code objektu do aplikace a nastavit počáteční teploty pro základní desku a HotEnd v závislosti na zvoleném materiálu (vláknu). Na obrázku v příloze B.1 lze vidět hlavní stránku aplikace, která zobrazuje graf s aktuálními teplotami periférií a tabulku zobrazující základní informace o tištěném objektu. Z tabulky je možno vyčíst:

- odhadovanou spotřebu vlákna při tisku,
- dobu tisku,
- výšku objektu,
- uplynulý čas od začátku tisku,
- čas, který zbývá do vytištění celého objektu.

Záložka Contol obsahuje tlačítka pro manuální ovládání tiskárny (ve směru jednotlivých os), vytlačování či zatahování vlákna o určitou délku, ovládání chladicího ventilátoru a vypínání krokových motorů. Největší část této záložky zaujímá živý videopřenos z tiskového přenosu (pokud je k dispozici webová kamera). Obrázek záložky Controls je zobrazen v příloze B.2. Záložka Viewer zobrazuje vrstvy aktuálně tištěného objektu. V záložce Terminal lze sledovat komunikaci mezi webovým tiskovým serverem a firmwarem 3D tiskárny. [19]

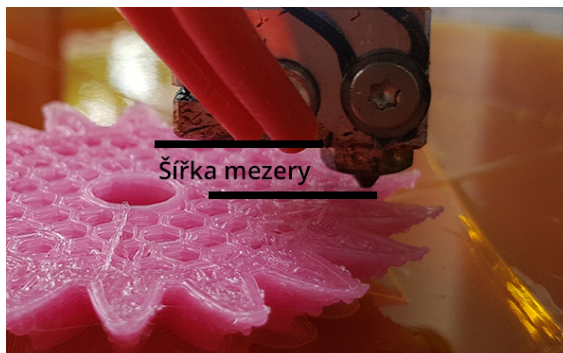
5 OPTIMALIZACE VYHŘÍVÁNÍ TISKOVÉHO PROSTORU A KONTROLA CHLAZENÍ VÝ-TISKU

Většina amatérsky vyráběných 3D tiskáren je konstruována bez ochranných prvků, kterými lze tiskárnu zapouzdřit. Nezapouzdřené tiskárny mají výhodu v lepší cirkulaci vzduchu, hmotnosti tiskárny a její skladnosti.

Naproti tomu zapouzdřené tiskárny (například do průhledných plastových desek) mají svou výhodu při tisku objektů velkých rozměrů, kde je zapotřebí objekt vyhřívat v celé jeho velikosti. Díky zapouzdření tiskárny lze získat daleko větší teplotní stabilitu uvnitř tiskárny a tuto teplotu regulovat. Není zde zapotřebí přídavných topných těles, které tištěný objekt vyhřívají. Plně dostačující pro vyhřívání vnitřního prostoru je základní deska, kterou je nutné zahřát před začátkem tisku na specifickou teplotu pro daný materiál (vlákno) tisku. Pokud je tiskárna kvalitně zapouzdřena (utěsněna), tak je základní deska schopna vyhřát vnitřní prostor tiskárny v průběhu tisku objektu. Není nutné vyhřívat celý vnitřní prostor tiskárny před začátkem tisku a tato procedura se stává až zbytečnou. Ohřev základní desky na požadovanou teplotu (například pro ABS 110°C) trvá necelých deset minut. V tomto krátkém časovém intervalu lze vyhřát dolní třetinu tiskového prostoru nebo se přiblížit této teplotě. V samotném průběhu tisku udržuje základní deska konstantní teplotu (110 °C) a než je dosaženo výšky jedné třetiny tištěného objektu, je základní deska schopna vyhřát celý vnitřní prostor tiskárny.

Vyhřívání vnitřního prostoru tiskárny a její zapouzdření přináší i svá úskalí. Vnitřní prostor tiskárny je vyhříván z důvodů lepšího spojení (navázání, propojení) jednotlivých vrstev. Například pro materiál ABS je základní deska zahřívána na teplotu 110 °C a teplota HotEndu pro tavení vlákna je 220 °C. Nevýhoda nastává v okamžiku tisku malých nebo drobných detailů objektu. Na obrázku 5.1 je zobrazen detail z tiskového procesu, kde si lze všimnout malé mezery mezi tištěným objektem a zahřátou částí HotEndu na 220 °C. Při tisku velkých ploch se HotEnd pohybuje v těsné blízkosti nad tištěným objektem a dochází k lokálnímu ohřevu objektu. Nevýhoda tohoto lokálního ohřevu se projevuje na malých detailech, špičkách, hranách tisknutého objektu, kde jsou tyto útvary zahřáty na teplotu, při které materiál ztrácí svoji pevnost a může dojít k deformaci či zkroucení těchto míst vedoucí ke znehodnocení tištěného objektu.

Těmto problémům lze předejít přidáním chladicího ventilátoru. Úskalí nastává v okamžiku směřování proudu vzduchu mezi tištěný objekt a HotEnd a regulaci vý-



Obr. 5.1: Detail mezery mezi HotEndem a tištěným objektem.

konu ventilátoru. Regulace výkonu ventilátoru je velice důležitá vlastnost, protože při velkém výkonu je vysoká pravděpodobnost změny pozice vytlačovaného vlákna a znehodnocení tisku. Při malém výkonu ventilátoru nemusí docházet k efektivnímu chlazení mezery mezi HotEndem a objektem. Většina expanzních desek má speciální rozhraní pro připojení chladících ventilátorů, kde je jejich výkon řízen pomocí MOS-FET tranzistorů. Jejich výkon specifikuje software CAM, který umožňuje nastavení výkonu ventilátoru pro specifickou fázi tisku (tisk podpěr, malých prostor, atd.).

Po úspěšném vytištění předmětu, bez sebemenších chyb, je potřeba daný objekt efektivně ochladit. Při prudkém ochlazení objektu může dojít k jeho zkroucení či v extrémních případech oddělení jednotlivých vrstev. Proto je nutné zajistit, aby se vytištěný objekt velkých rozměrů chladil pozvolna a nedocházelo zde k velkým teplotním rozdílům. Pokud je tiskárna zapouzdra, lze přidat do jejího rámu ventilátor, který bude vhánět do tiskového prostoru čerstvý vzduch s malým výkonem, aby se objekt pozvolna a postupně chladil. Pokud tento ventilátor není k dispozici, nejlepší možnost je nechat objekt samovolně vychladnout. Po dosažení pokojové teploty je možné s ním začít manipulovat. Tato metoda se může zdát poněkud zdlouhavá, ale v porovnání s dobou tisku velkého objektu je doba samovolného chladnutí zanedbatelná.

6 SHRUTÍ HARDWARU 3D TISKÁRNY A JEJÍ CENOVÁ KALKULACE

V předešlých kapitolách byly uvedeny základní funkce, materiály, hardware a expanzní deska, které jsou nezbytné pro konstrukci tiskárny typu delta. Tato kapitola se zabývá specifikací finálních komponent, včetně jejich ceny a stanovení výsledné ceny, za kterou lze 3D tiskárnu typu delta zakoupit.

Při výběru komponent bylo diskutováno, zda zakoupit originální drahé nebo neoriginální levné díly z Číny. V tomto ohledu byl zvolen kompromis, kdy komponenty, které jsou pro kvalitu tisku klíčové, byly zakoupeny z originálních obchodů a ostatní byly zakoupeny jako neoriginální. Většina dílů byla zakoupena na internetovém serveru eBay, kde lze nalézt veliký výběr požadovaných komponent za rozumné ceny. Rám konstrukce, krokové motory a HotEnd byly zakoupeny z oficiálních stránek obchodů, které se specializují na jejich prodej a garantují jejich kvalitu pro využití v 3D tisku. Soupis jednotlivých komponent včetně jejich ceny je zobrazen v tabulce 6.1.

Tab. 6.1: Cenový rozpočet jednotlivých komponent včetně celkové ceny.

Komponenta	Počet kusů	Cena
Rám konstrukce	3 x 600 mm, 9 x 240 mm	1549 Kč
HotEnd	1	1700 Kč
Krokové motory	4	916 Kč
Ovladače krokových motorů	5	252 Kč
Delta ramena	6	650 Kč
Řemenice s hřídelemi	1 x 5 m	425 Kč
Lineární vedení	3	1750 Kč
Počítačový ATX zdroj	1	700 Kč
Extruder	1	250 Kč
Hnací ozubené kolo Extruderu	2	74 Kč
Expanzní deska	1	685 Kč
BeagleBone Black	1	1400 Kč
LED osvětlení	1	230 Kč
		10578 Kč

Po zakoupení těchto komponent není tiskárna zdaleka kompletní. Dále je zapotřebí obstarat díly jako krajní držáky konstrukce, efektor a další. Výhoda těchto dílů spočívá v tom, že je lze vytisknout na již sestavené 3D tiskárně a tím značně

ušetřit. Pro tisk výše zmíněných dílů je potřebné pouze vhodné vlákno, které se prodává na cívce o hmotnosti 1 kg za cenu přibližně 600 Kč. S takovouto cívkou lze vytisknout díly pro více než 3 tiskárny. Soupis všech tisknutelných dílů, včetně počtu potřebných kusů, je uveden v tabulce 6.2.

Tab. 6.2: Soupis tisknutelných dílů včetně množství kusů.

Díl	Počet kusů
Efektor	1
Spodní díl konstrukce (držák motoru)	3
Horní díl konstrukce (držák řemenice)	3
Vozík	3
End stop	6
Uchycení základní desky	3
Uchycení chladícího ventilátoru pro HotEnd	3
Držák pro uchycení cívky s vláknem	3

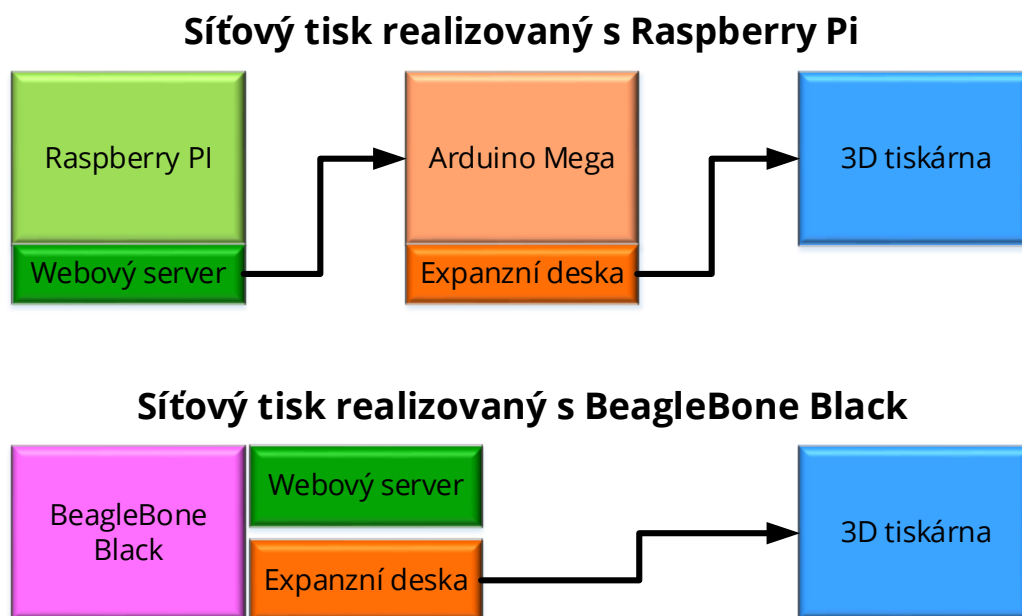
6.1 Srovnání s Raspberry Pi a Ramps 1.4

Raspberry Pi se v technologii 3D tisku nevyužívá jako hlavní řídicí jednotka, ale je využito jako zařízení, skrze které lze zajistit podporu síťového tisku 3D tiskárny.

Podporu síťového tisku na Raspberry Pi lze zajistit 2 způsoby. První způsob spočívá v instalaci softwarového nástroje pro tisk v systému Raspberry Pi s využitím vzdálené plochy (VNC viewer) pro ovládání software. Tato možnost není elegantním řešením síťového tisku, ale bývá hojně využívána. Druhý způsob síťového tisku je podobný systému využitím v této práci. Na platformě Raspberry Pi běží webový server, přes který lze 3D tiskárnu vzdáleně ovládat. Arduino Mega s expanzní deskou Ramps 1.4 jsou připojeny přes USB kabel k Raspberry Pi, kde webový server přistupuje k USB rozhraní a posílá skrze něj G-code příkazy. Arduino tyto příkazy zpracovává a ovládá periferie 3D tiskárny prostřednictvím expanzní desky.

Na obrázku 6.1 je zobrazeno blokové schéma porovnání síťového tisku mezi platformami Raspberry Pi a BeagleBone Black. Nevýhoda řešení síťového tisku s Raspberry Pi je v počtu užitých zařízení a jeho ceně. Při realizaci tohoto typu síťového tisku je zapotřebí Raspberry Pi jako řídicí část a Arduino Mega jako výpočetní část 3D tiskárny.

Řešení navržené v tomto projektu spojuje řídicí a výpočetní část do jedné platformy, kterou je v této práci BeagleBone Black. Tím lze ušetřit náklady za pořízení Raspberry Pi jako tiskového serveru.



Obr. 6.1: Blokové schéma síťového tisku.

7 ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo navrhnout amatérskou 3D tiskárnu typu delta s výběrem a popisem jednotlivých hardwarových komponent. Tyto komponenty byly vybírány na základě vlastností při kvalitě a přesnosti tisku v závislosti na původu daného dílu a jeho ceny. Veškeré popsané komponenty v této práci zaručují tyto vlastnosti pro amatérské využití 3D tiskárny. Hlavní výpočetní jednotkou byla zvolena platforma BeagleBone Black, která umožňuje implementovat řídicí a ovládací funkce v jednom mikropočítači. Výběrem této výpočetní jednotky vznikla potřeba navrhnout rozšiřující modul (expanzní desku), který řídí jednotlivé periferie 3D tiskárny.

Expanzní deska byla navržena pro přímé osazení do GPIO pinů platformy BeagleBone Black. Tímto návrhem je dosaženo snížení počtu potřebné kabeláže a zpřehlednění připojení periférií k této desce. Deska je konstruována jako modulární. Tato konstrukce zajišťuje snadnou výměnu a opravu jednotlivých hardwarových dílů 3D tiskárny. Oproti komerčním řešením je deska rozšířena o připojení LED osvětlení, digitálních teplotních senzorů a většího počtu ventilátorů, které jsou využity při chlazení výtisku.

Optimalizace vyhřívání tiskového prostoru a kontrola chlazení výtisku byla popsána na základě zkušeností z tisku jednotlivých dílů při různých nastaveních 3D tiskárny. Z tohoto pozorování bylo popsáno nejefektivnější řešení zaručující optimalizaci teplot.

Platforma BeagleBone Black umožňuje připojení do LAN sítí prostřednictvím ethernetového kabelu či Wi-Fi. Díky této konektivitě je možné přistupovat na nainstalovaný webový server, který je využíván k vzdálenému ovládání tisku. Skrze webové rozhraní lze monitorovat průběh tisku a ovládat 3D tiskárnu z libovolného místa.

LITERATURA

- [1] BELL, Charles. *3D Printing with Delta Printers. 1*. New York: Apress, 2015. ISBN 978-1-484211-74-8.
- [2] HORVATH, Joan C. *Mastering 3D printing*. Berkeley, California: Apress, 2014, xxiii, 196 pages. Technology in action series. ISBN 9781484200261.
- [3] MK7 Drive gear - 3D Printers. *Scoob.net* [online]. 2015 [cit. 2015-12-14]. Dostupné z: <http://www.scoob.net/index.php/3d-printers/mk7-drive-gear.html>
- [4] *E3D Online* [online]. 2015 [cit. 2015-12-14]. Dostupné z: <http://e3d-online.com/>
- [5] Make Bournemouth. *Kossel Mini WIP / Make Bournemouth* [online]. 2015 [cit. 2015-12-15]. Dostupné z: <http://www.makebournemouth.com/?p=270>
- [6] Thingiverse. *Compact Bowden Extruder, direct drive 1.75mm* [online]. 214 [cit. 2015-12-15]. Dostupné z: <http://www.thingiverse.com/thing:275593>
- [7] Thingiverse. *Delta printer calibration object calibrate tower position and rod lengths errors + instructions* [online]. 2015 [cit. 2015-12-15]. Dostupné z: <http://www.thingiverse.com/thing:745523>
- [8] *RepRap - RepRapWiki* [online]. 2015 [cit. 2015-12-15]. Dostupné z: http://reprap.org/wiki/Main_Page
- [9] *3D Printer parts - Prusa Research* [online]. 2015 [cit. 2015-12-15]. Dostupné z: <http://shop.prusa3d.com/en/18-3d-printer-parts>
- [10] *BeagleBoard.org - black* [online]. 2015 [cit. 2015-12-15]. Dostupné z: <http://beagleboard.org/black>
- [11] *Gpio Class / guh - developer* [online]. 2013 [cit. 2015-12-15]. Dostupné z: <http://dev.guh.guru/gpio.html>
- [12] PRAX, Jakub. *Využití sběrnice I2C pro komunikaci s externím zařízením*. Brno, 2007. Dostupné z URL: <http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=8760/>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [13] *DRV8825 Stepper Motor Controller IC: Texas Instruments* [online]. 2014 [cit. 2016-05-25]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/drv8825.pdf>

- [14] DRV8825 Stepper Motor Driver Carrier, High Current. *Pololu Robotics and Electronics* [online]. Las Vegas, 2016 [cit. 2016-05-25]. Dostupné z: <https://www.pololu.com/product/2132>
- [15] *PCA9306 Dual Bidirectional I2C Bus and SMBus Voltage-Level Translator: Texas Instruments* [online]. 2016 [cit. 2016-05-25]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/pca9306.pdf>
- [16] *Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer: DS18B20* [online]. 2015 [cit. 2016-05-25]. Dostupné z: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>
- [17] *CMOS Hex Buffer/Converters: CD4049UB, CD4050B* [online]. 2015 [cit. 2016-05-25]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cd4049ub-mil.pdf>
- [18] *PCA9685: 16-channel, 12-bit PWM Fm+ I2C-bus LED controller* [online]. 2015 [cit. 2016-05-25]. Dostupné z: <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/PCA9685.pdf>
- [19] *OctoPrint's documentation: OctoPrint* [online]. 2016 [cit. 2016-05-25]. Dostupné z: <http://docs.octoprint.org/en/master/>
- [20] *Documentation: Slicer 4* [online]. 2015 [cit. 2016-05-25]. Dostupné z: <https://www.slicer.org/slicerWiki/index.php/Documentation>

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

3D	trojdimenzionální
CAD	Computer-Aided Design
STL	Standard Tessellation Language
CAM	Computer-Aided Manufacturing
FFF	Fused Filament Fabrication
PC	Polykarbonát
Nylon	Polyamid 6.6
HIPS	Vysoce houževnatý polystyren
ABS	Akrylonitril butadien styren
PET	Polyethylen tereftalát
PVA	Polyvinylalkohol
PLA	Polylaktid
PTFE	Polytetrafluorethylen
RepRap	Replicating rapid prototyper
USB	Universal Serial Bus
PWM	Pulse Width Modulation
LCD	Liquid crystal display
I2C	Inter-integrated circuit
GPIO	General-purpose input/output
LED	Light-Emitting Diode
WEB	World Wide Web
GUI	Grafické uživatelské rozhraní
LAN	Local Area Network

SEZNAM PŘÍLOH

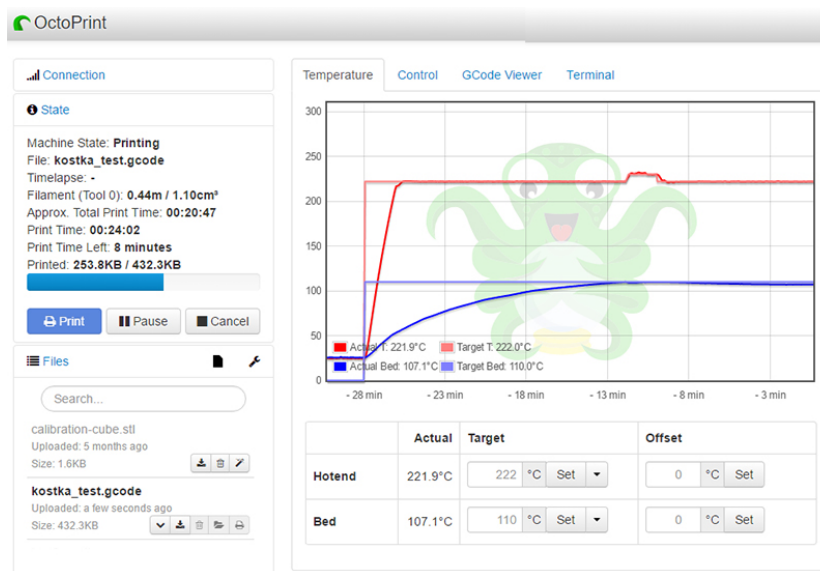
A	Popis GPIO pinů BeagleBone Black	61
B	Screenshoty z webové aplikace OctoPrint.	62
C	Schéma zapojení a deska plošných spojů expanzní desky	63
D	Ukázky zdrojových kódů	71

A POPIS GPIO PINŮ BEAGLEBONE BLACK

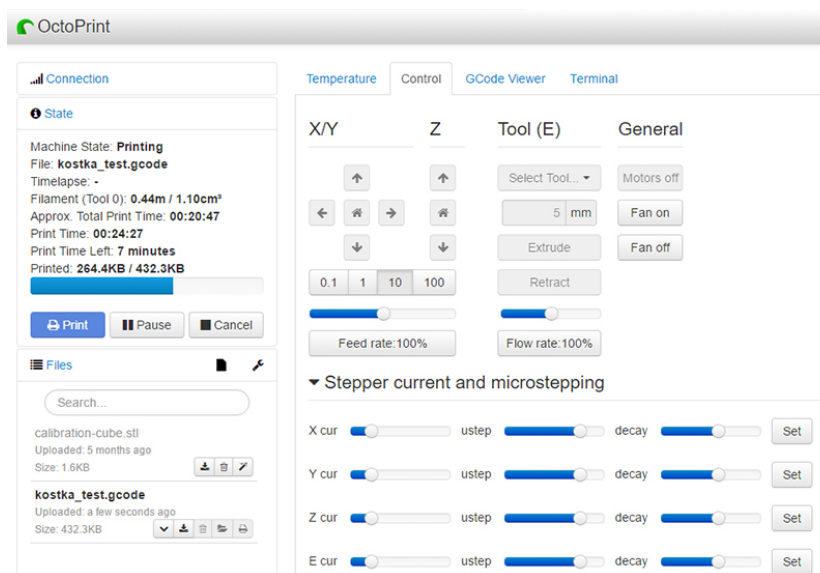
P9										P8									
7		1		2		7		1		2		7		1		2		7	
DGND		1		2		7		1		2		7		1		2		7	
VDD 3.3		3		4		VDD 3.3		3		4		VDD 3.3		3		4		VDD 3.3	
VDD 5V		5		6		VDD 5V		5		6		VDD 5V		5		6		VDD 5V	
SYS 5V		7		8		SYS 5V		7		8		SYS 5V		7		8		SYS 5V	
PWR_BTN		9		10		SYS_RESETN		9		10		SYS_RESETN		9		10		SYS_RESETN	
UART4_RX(6)	GPIO_30	28	11	12	30	GPIO_60		GPIO_30	28	11	12	30	GPIO_60		GPIO_30	28	11	12	30
UART4_TX(6)	GPIO_31	29	13	14	18	GPIO_40	PWM_1A(6)	GPIO_31	29	13	14	18	GPIO_40	PWM_1A(6)	GPIO_31	29	13	14	18
PWM_TRIPZ_IN	GPIO_48	16	15	16	19	GPIO_51	PWM_1B(6)	GPIO_48	16	15	16	19	GPIO_51	PWM_1B(6)	GPIO_48	16	15	16	19
I2C-1_SCL(2)	GPIO_4	87	17	18	86	GPIO_5	I2C-1_SDA(2)	GPIO_4	87	17	18	86	GPIO_5	I2C-1_SDA(2)	GPIO_4	87	17	18	86
I2C-2_SCL(3)	GPIO_13	95	19	20	94	GPIO_12	I2C-2_SDA(3)	GPIO_13	95	19	20	94	GPIO_12	I2C-2_SDA(3)	GPIO_13	95	19	20	94
UART2_TX(1)	GPIO_3	85	21	22	84	GPIO_2	UART2_RX(1)	GPIO_3	85	21	22	84	GPIO_2	UART2_RX(1)	GPIO_3	85	21	22	84
PWM0_SYNC0	GPIO_49	17	23	24	97	GPIO_15	UART1_TX(0)	GPIO_49	17	23	24	97	GPIO_15	UART1_TX(0)	GPIO_49	17	23	24	97
	GPIO_117	107	25	26	96	GPIO_14	UART1_RX(0)	GPIO_117	107	25	26	96	GPIO_14	UART1_RX(0)	GPIO_117	107	25	26	96
	GPIO_125	105	27	28	103	GPIO_113	SPI-1_CS0(3)	GPIO_125	105	27	28	103	GPIO_113	SPI-1_CS0(3)	GPIO_125	105	27	28	103
SPI-1_D0(3)	GPIO_111	101	29	30	102	GPIO_112	SPI-1_D1(3)	GPIO_111	101	29	30	102	GPIO_112	SPI-1_D1(3)	GPIO_111	101	29	30	102
SPI-1_SCLK(3)	GPIO_110	100	31	32		VDD_ADC		GPIO_110	100	31	32		VDD_ADC		GPIO_110	100	31	32	
	AIN4	33	33	34		GND_ADC		AIN4	33	33	34		GND_ADC		AIN4	33	33	34	
	AIN6	35	35	36		AIN5		AIN6	35	35	36		AIN5		AIN6	35	35	36	
	AIN2	37	37	38		AIN3		AIN2	37	37	38		AIN3		AIN2	37	37	38	
	AIN0	39	39	40		AIN1		AIN0	39	39	40		AIN1		AIN0	39	39	40	
	GPIO_20	41	41	42		GPIO_7		GPIO_20	41	41	42		GPIO_7		GPIO_20	41	41	42	
	DGND	43	43	44		DGND		DGND	43	43	44		DGND		DGND	43	43	44	
	DGND	45	45	46		DGND		DGND	45	45	46		DGND		DGND	45	45	46	

Obr. A.1: Popis GPIO pinů pro BeagleBone Black. [11]

B SCREENSHOTY Z WEBOVÉ APLIKACE OCTOPRINT.

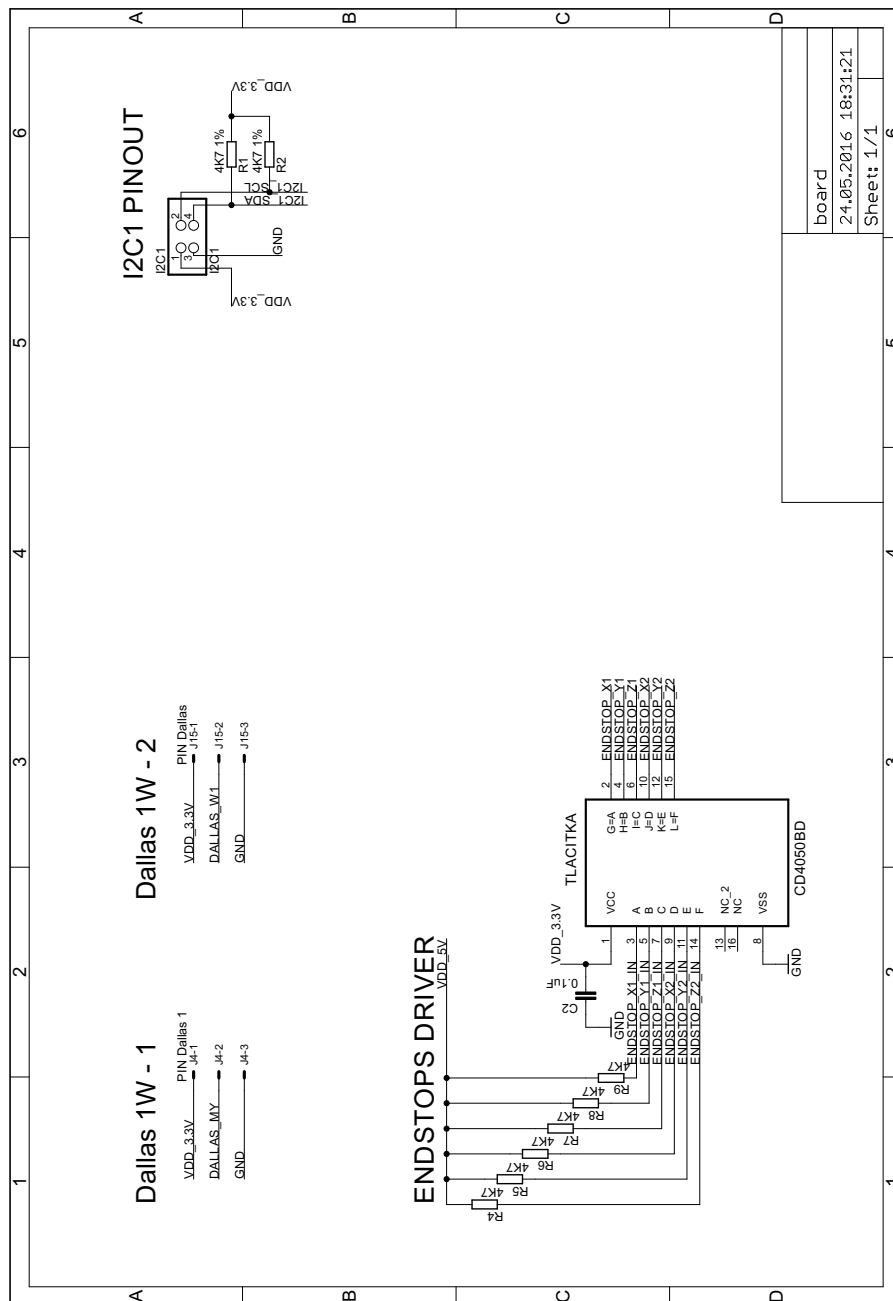


Obr. B.1: Hlavní nabídka webové aplikace OctoPrint.

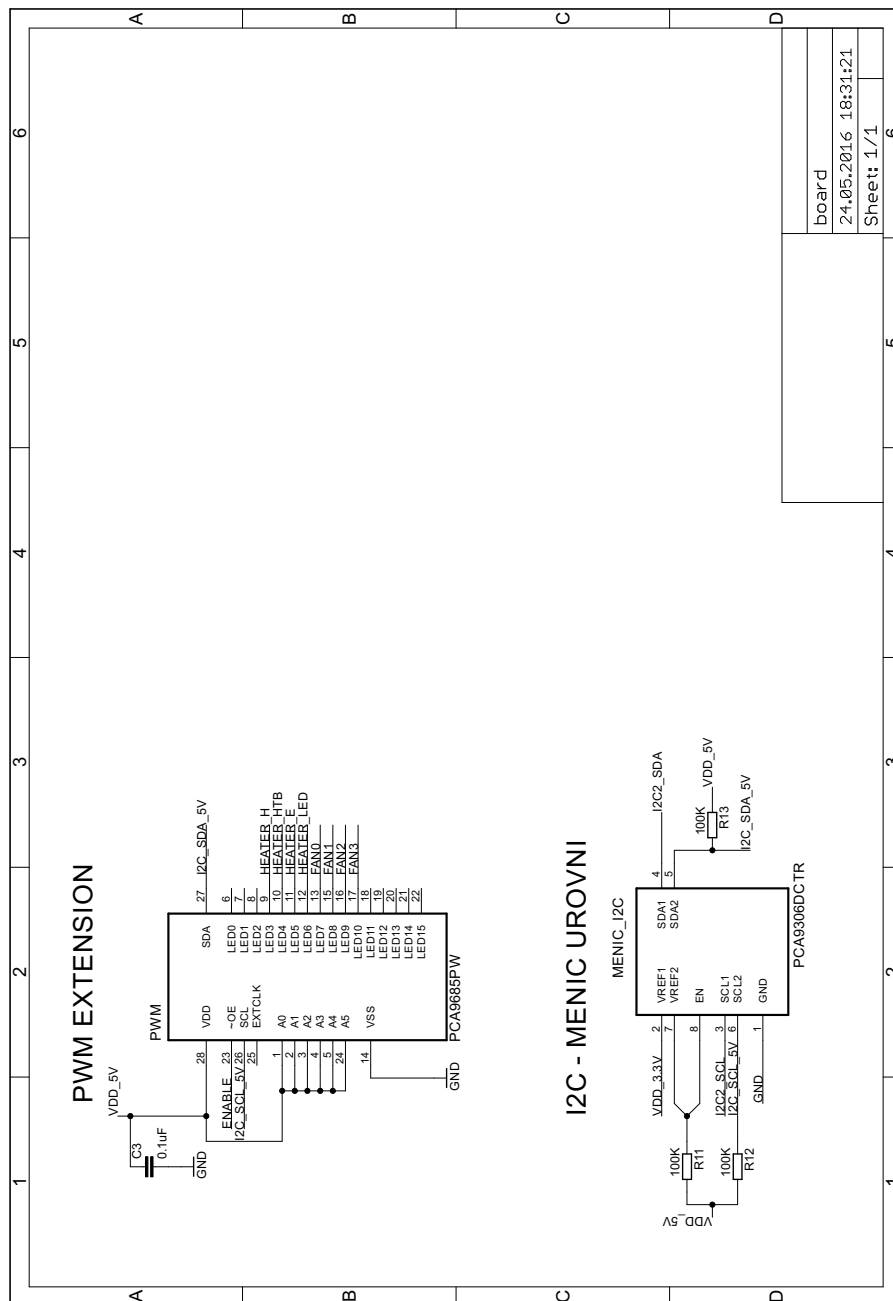


Obr. B.2: Nabídka Control webové aplikace OctoPrint. [11]

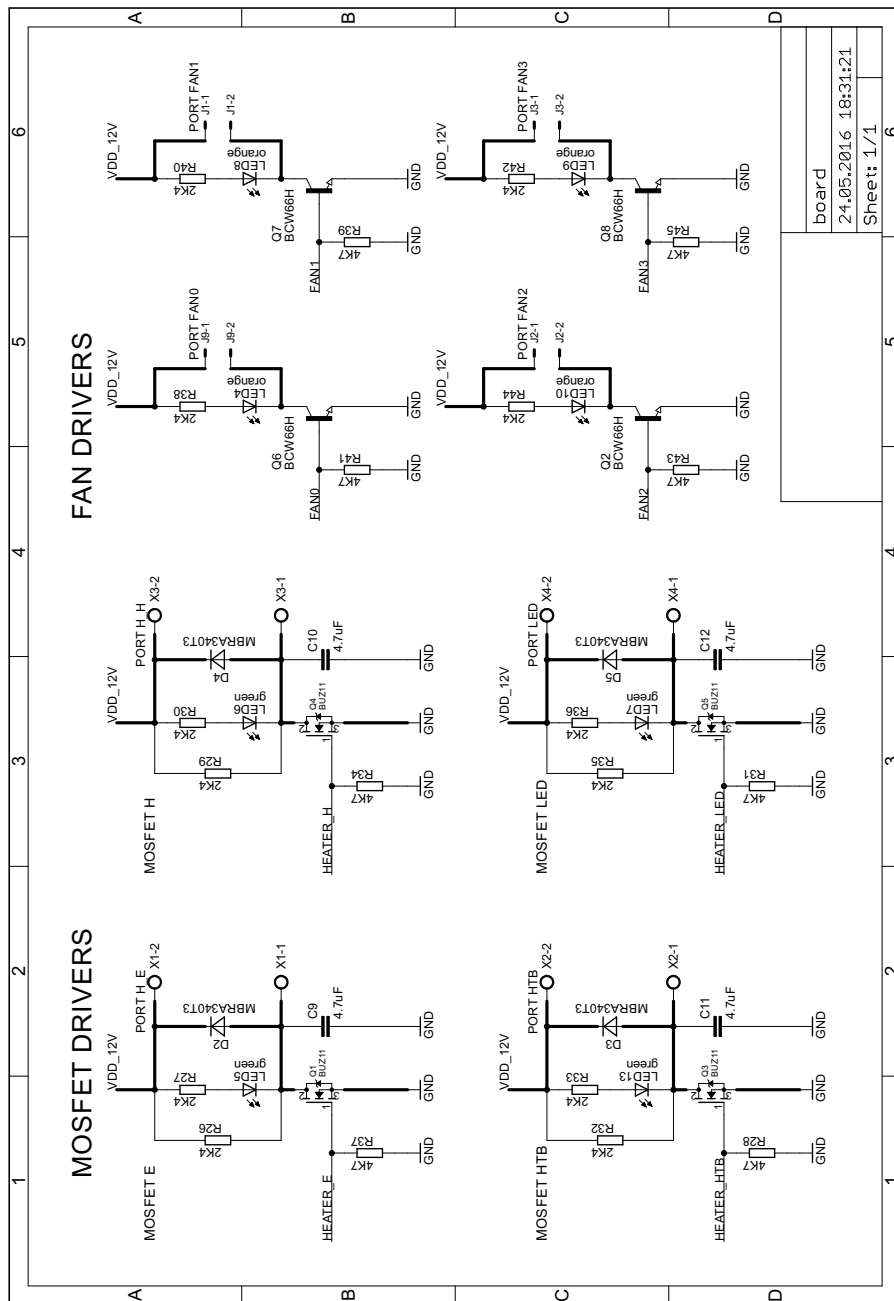
C SCHÉMA ZAPOJENÍ A DESKA PLOŠNÝCH SPOJŮ EXPANZNÍ DESKY



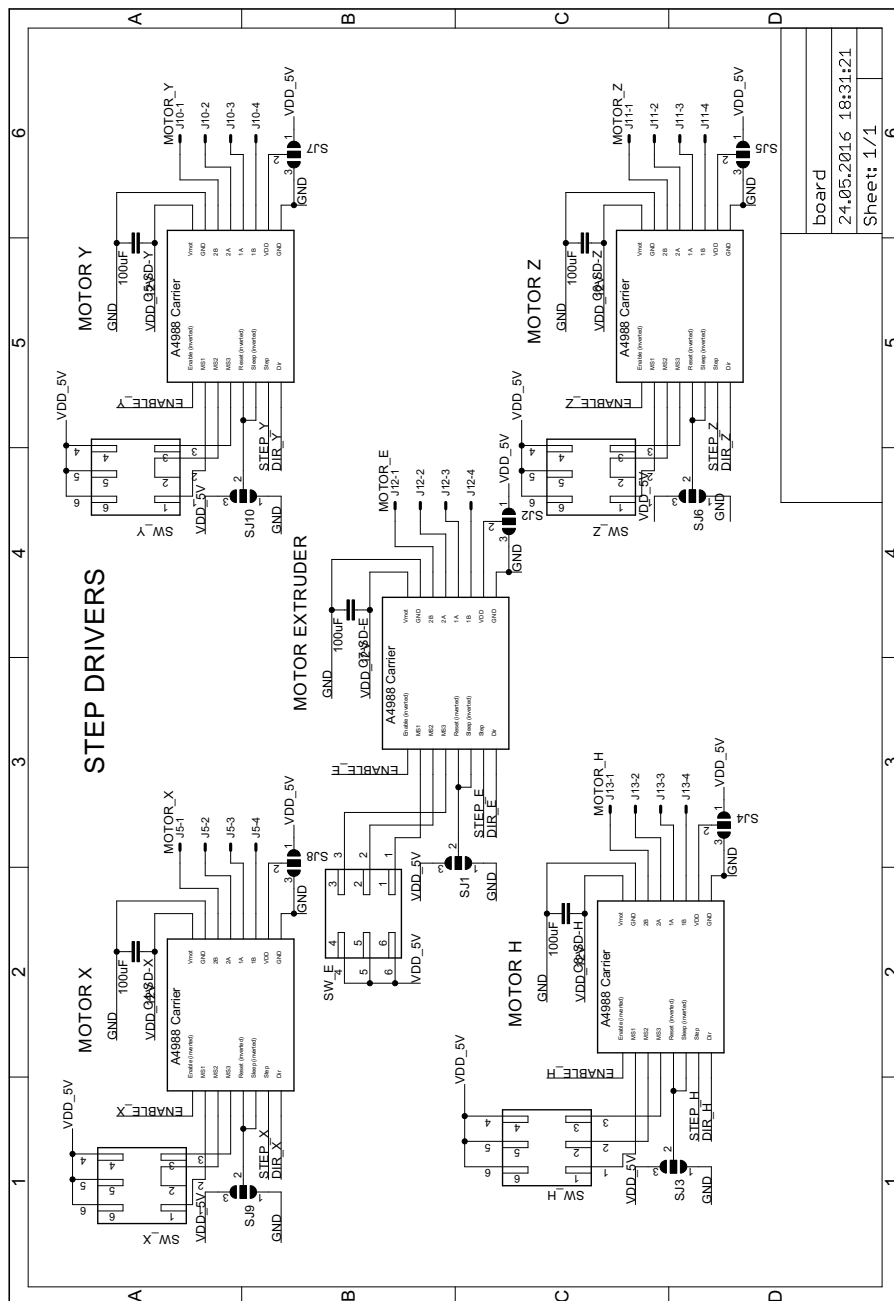
Obr. C.1: Schéma zapojení expanzní desky - 1. část.



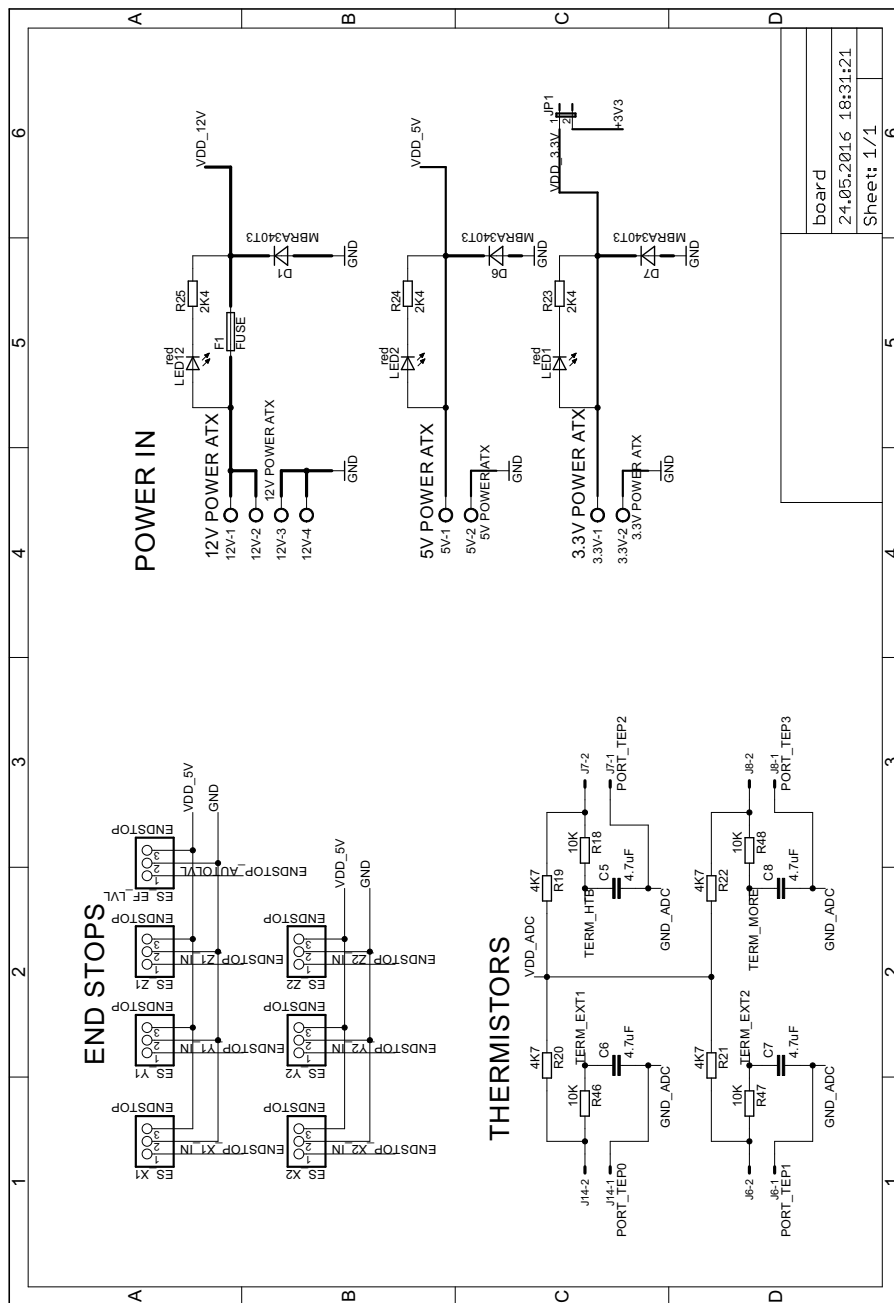
Obr. C.2: Schéma zapojení expanzní desky - 2. část.



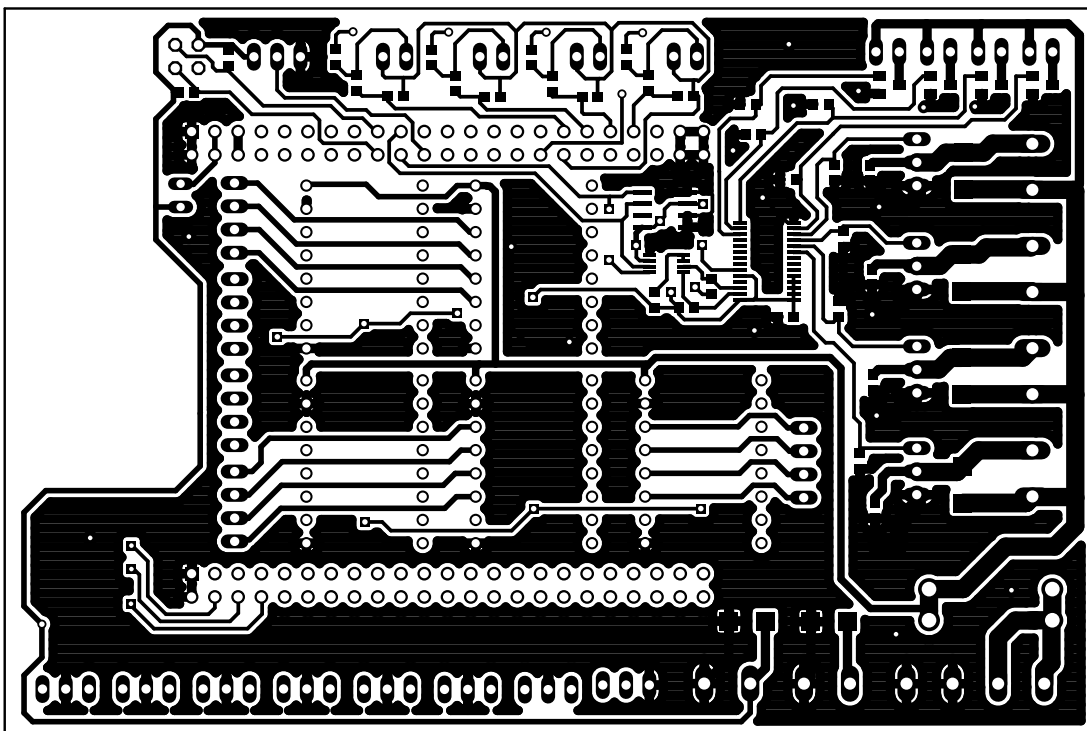
Obr. C.3: Schéma zapojení expanzní desky - 3. část.



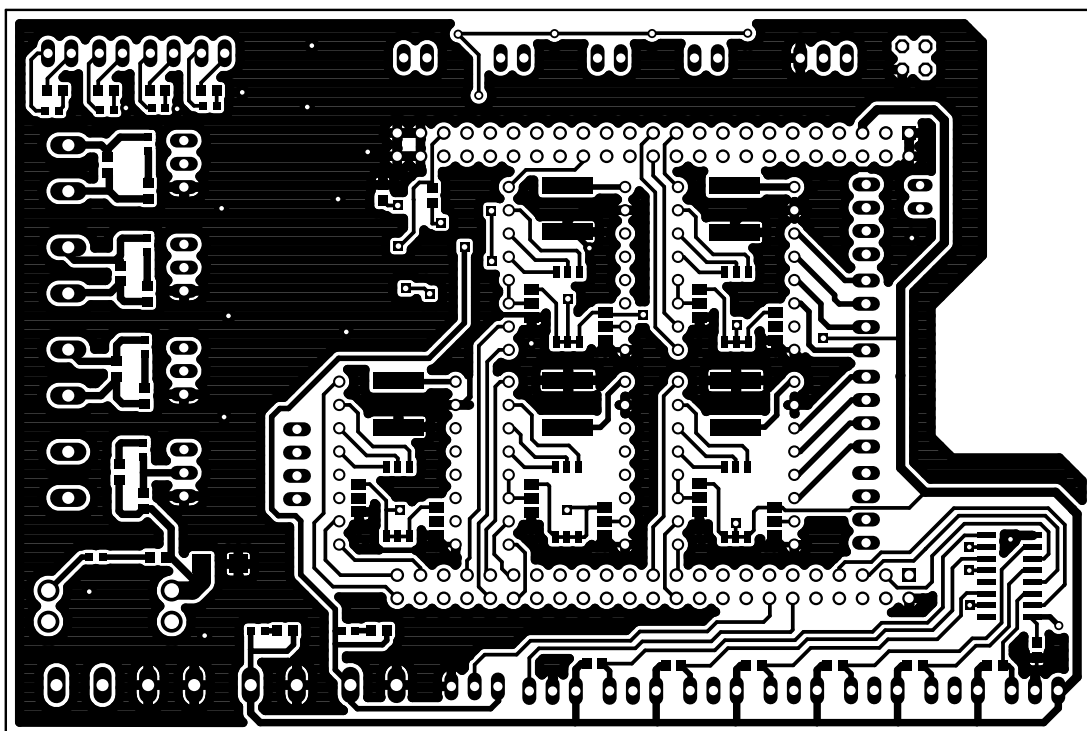
Obr. C.4: Schéma zapojení expanzní desky - 4. část.



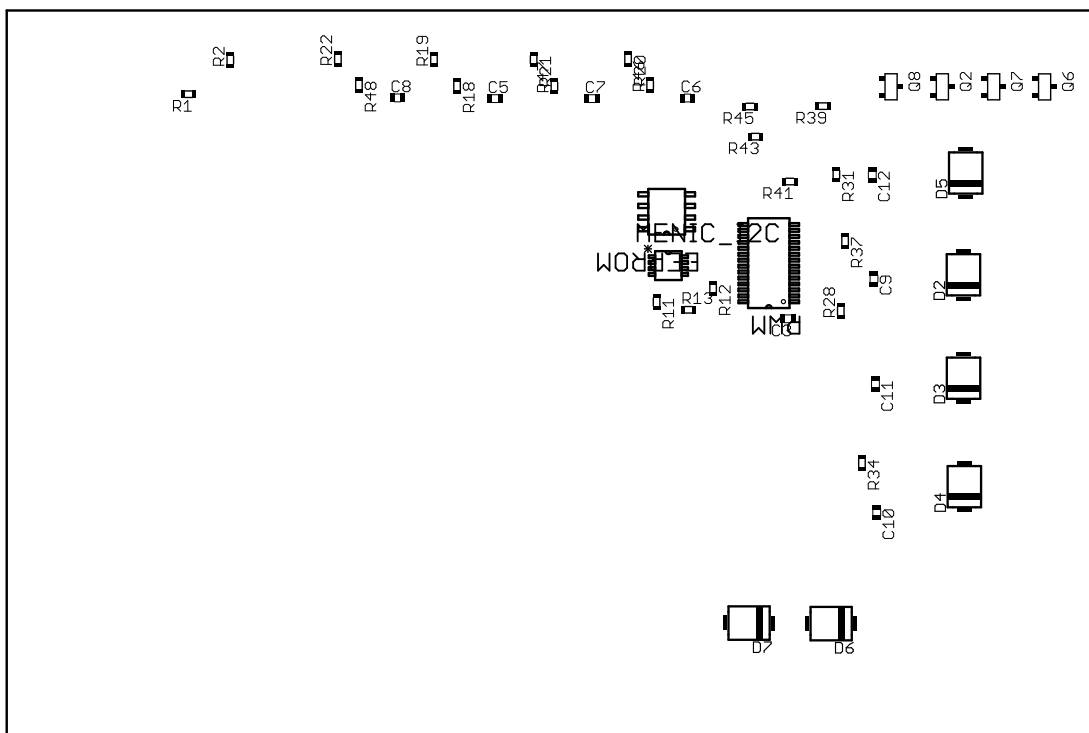
Obr. C.6: Schéma zapojení expanzní desky - 6. část.



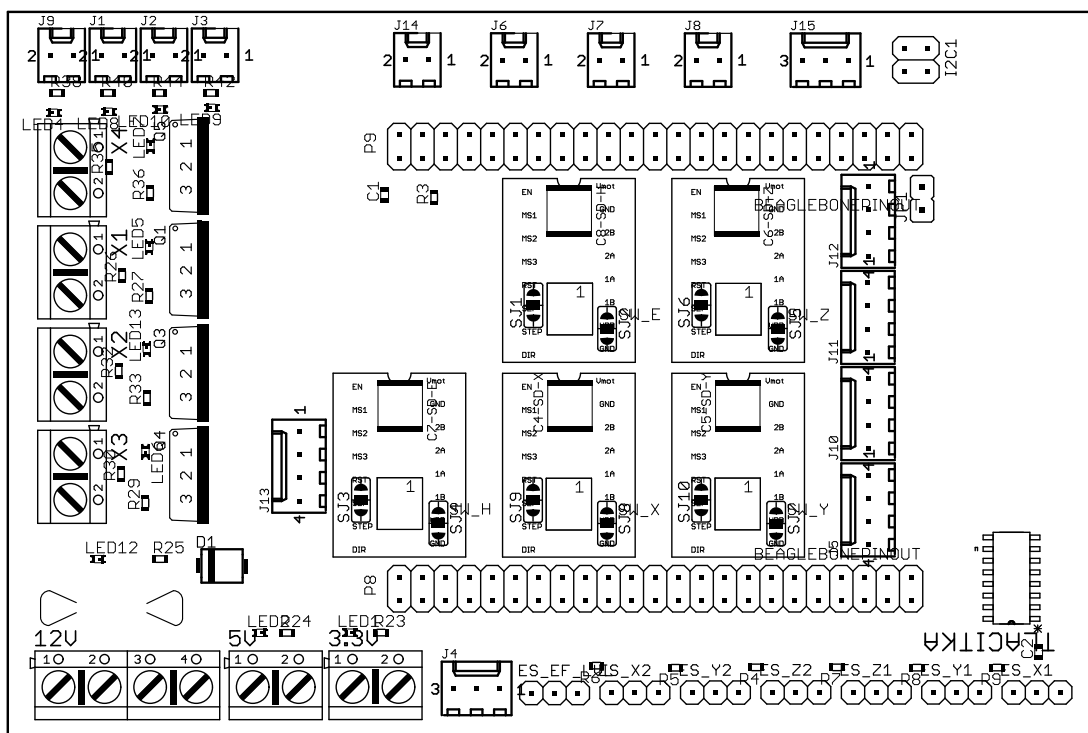
Obr. C.7: Předloha desky plošných spojů spodní strana.



Obr. C.8: Předloha desky plošných spojů vrchní strana.



Obr. C.9: Osazovací plán spodní strany desky plošných spojů.



Obr. C.10: Osazovací plán vrchní strany desky plošných spojů.

D UKÁZKY ZDROJOVÝCH KÓDŮ

Listing D.1: Ukázka kódu pro nastavení domácí pozice.

```
def execute(self, g):
    if g.num_tokens() == 0: #Pokud G-Code neobsahuje zadne parametry
        g.set_tokens(["X0", "Y0", "Z0", "E0", "H0"])#Manualni nastaveni domaci pozice

    axis_home = []

    for i in range(g.num_tokens()): #Nastaveni domaci pozice jednotlivym osam
        axis = g.token_letter(i)
        if self.printer.config.getboolean('Endstops','has_' + axis.lower()):
            axis_home.append(axis)

    self.printer.path_planner.wait_until_done()
    self.printer.path_planner.home(axis_home)

    logging.info("Homing done.")
    self.printer.send_message(g.prot, "Homing done.")
```

Listing D.2: Ukázka kódu pro vypnutí krokových motorů.

```
def execute(self, g):
    logging.debug("Execute M18")
    self.printer.path_planner.wait_until_done()
    # Pokud G-Code neobsahuje zadne parametry, vypnou vsechny motory
    if g.num_tokens() == 0:
        g.set_tokens(self.printer.steps.keys())

    for i in range(g.num_tokens()): # Vypnuti vseh motoru
        axis = g.token_letter(i) # Nazvu motoru, X, Y, Z or E
        self.printer.steps[axis].set_disabled() # Vypnuti
```

Listing D.3: Ukázka kódu pro krokové motory.

```
def execute(self, g):
    if g.has_letter("F"): # Rychlost pohybu
        # Prevod z mm/minutu na mm/sekundu
        self.printer.feed_rate = float(g.get_value_by_letter("F"))
        self.printer.feed_rate /= 60000.0
        g.remove_token_by_letter("F")
    smds = {}
    for i in range(g.num_tokens()):
        axis = g.token_letter(i)
        #Ziskani nove pozice
        value = float(g.token_value(i)) / 1000.0
        if axis in ('E', 'H', 'A', 'B', 'C') and self.printer.extrude_factor != 1.0:
            value *= self.printer.extrude_factor
        smds[axis] = value
    if self.printer.movement == Path.ABSOLUTE:
        path = AbsolutePath(smds, self.printer.feed_rate * self.printer.factor,
                           self.printer.accel)
    elif self.printer.movement == Path.RELATIVE:
        path = RelativePath(smds, self.printer.feed_rate * self.printer.factor,
                           self.printer.accel)
    else:
        logging.error("invalid movement: " + str(self.printer.movement))
    return
```